



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

LARISSA PACHECO ANDRADE

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE COEFICIENTES DE ATRITO DE DIFERENTES PARTÍCULAS PARA APLICAÇÃO NA MODELAGEM DE ESCOAMENTOS DENSOS

SÃO CARLOS – SP

2022

LARISSA PACHECO ANDRADE

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE COEFICIENTES DE ATRITO DE DIFERENTES PARTÍCULAS PARA APLICAÇÃO NA MODELAGEM DE ESCOAMENTOS DENSOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, *Campus* São Carlos-SP, como parte dos requisitos de obtenção do título de mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Gabriela Cantarelli Lopes

SÃO CARLOS – SP

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Larissa Pacheco Andrade, realizada em 31/08/2022.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Gabriela Cantarelli Lopes (UFSCar)

Profa. Dra. Liliana de Luca Xavier Augusto (UTFPR)

Prof. Dr. Thiago Faggion de Pádua (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

AGRADECIMENTOS

Mais uma vez Deus me fortaleceu para chegar a mais um fim de desafio. Soube o que era necessário para minha evolução, por isso, não seria justo não agradecê-lo por isso. Mas, jamais deixarei de batalhar e fazer por merecer ao lado dos meus pais divinos: meus orixás Oxum e Ogum. Minha mãe que sempre esteve a minha guia, que sempre me ofereceu de seu amor e proteção, obrigada seria pouco em lhe dizer. E meu pai Ogum, que me ensinou ir para a luta, me ensinando que filho de guerreiros, guerreiros também são. Orayeyê minha mãe, Ogunhê meu pai. A todos os guias que me acompanham: um singelo Axé!

A meus pais, João Batista e Eni Dalva, pelo dom da vida que me deram, e que agora, mesmo estando longe dessas minhas novas jornadas de vindas e voltas, se preocupam sem deixar de serem meus maiores incentivadores. Vocês me ensinaram valores que levarei para gerações futuras. Obrigada por torcerem por mim, e por me darem forças para realizar meus sonhos, enchendo minha vida de felicidade. Obrigada por todo esse acompanhamento de longos meses de distância física. As compras de passagem de avião, mesmo cara, são sempre uma alegria, pois é quando começa a contagem regressiva para vê-los.

À minha orientadora, que teve toda paciência em me explicar, em orientar e principalmente em compartilhar de seu conhecimento e paciência nestes últimos meses longe. Obrigada pela amizade, que espero levar para a vida. Obrigada por entender minhas fases.

À minha família espiritual, que forcem pelo sucesso e me recebem com tanto amor e carinho todas as vezes que volto para minha cidade. Em especial meu padrinho Pai André d'Odé e minha madrinha Mãe Valéria d'Exú. Sem a força que vocês me dão, nada eu seria.

Aos colegas que me apoiaram nessa fase de três anos, todas as amizades que fiz que me ajudaram nas matérias pesadas e compartilharam comigo conhecimentos e risadas, tornando o peso do mestrado menor, contato aqui com a galera do laboratório. Mas em especial ao João Pedro, que por muitas vezes era meu par de trabalhos e se mostrou próximo o tempo todo.

Também ao técnico da engenharia mecânica Hugo, que em inúmeras vezes que precisei ajuda nunca me disse não. Torço muito pela sua vitória. Não deixo de lado toda equipe da engenharia mecânica e o professor Fabrício.

Agradeço a UFSCar, pela oportunidade de ter realizado um dos meus sonhos que era estudar nessa grande universidade. Sem esquecer os recursos recebidos. A alegria que tive de

saber que eu fiz parte desse mundo me é imensa. E a banca, Liliane Augusto (UTFPR) e Thiago da Padua (UFSCar), por aceitar meu convite.

APOIO FINANCEIRO

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Sistemas envolvendo partículas são muito comuns em diversas aplicações de engenharia. A interação entre essas partículas e delas com as superfícies dos equipamentos pode afetar fortemente na sua distribuição, o que muitas vezes irá influenciar no rendimento ou na eficiência de um processo. Por causa disso, é importante conhecer como essa interação se dá. Os coeficientes de atrito são parâmetros fundamentais para o estudo do movimento e da interação de partículas, principalmente quando sua concentração é alta. A determinação direta desses coeficientes costuma ser uma tarefa complexa, uma vez que sua medição pode ser afetada por uma série de fatores, como, por exemplo, a planicidade da superfície e o formato da partícula. Por causa disso, são escassos os trabalhos que façam a determinação experimental direta desses coeficientes. São ainda mais raros estudos que relacionem estes parâmetros com as características das partículas e das superfícies. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo obter experimentalmente os coeficientes de atrito estático e dinâmico de partículas com diferentes propriedades físicas, elásticas e superficiais, e testar diferentes metodologias para a sua determinação. Partículas de Acrinolitrina Butadieno Estireno (ABS), fluorelastômero, borracha nitrílica, alumina e porcelana foram empregadas nestes testes. Para a determinação do coeficiente de atrito de rolamento foram empregadas duas metodologias: Norma ASTM G194-08 (2008) e o método do lançamento oblíquo proposto por Goya et al. (2014) e Neto e Cruz (2015). Já para o coeficiente de atrito de deslizamento, foram empregadas outras duas metodologias: o método do plano inclinado (Lima, 2017) e o método de determinação a partir da análise dos dados obtidos pelo método da rampa inclinada (Goya et al., 2014). Superfícies de acrílico e vidro foram utilizadas na determinação dos coeficientes de atrito para os pares partícula-superfície. Os resultados evidenciaram que há influência das propriedades superficiais e elásticas sobre os coeficientes. Além disso, foi possível verificar que o método aplicado também pode ter influência sobre os valores dos coeficientes. Para o atrito de rolamento, por exemplo, os diferentes métodos resultaram em valores próximos somente para partículas com superfícies mais uniformes, indicando que é necessário cuidado na escolha do método quando se trabalha com partículas com superfícies menos uniformes. O presente estudo foi principalmente útil na comparação dos métodos diretos para determinação dos coeficientes de atrito. No entanto, uma maior investigação da influência das propriedades das partículas sobre esses parâmetros se faz necessária, a fim de possibilitar a correlação dessas variáveis.

Palavras-chave: Coeficientes de atrito, rolamento, deslizamento, rugosidade, métodos.

ABSTRACT

Systems involving particles are very common in many engineering applications. The interaction between these particles and of them with the equipment surfaces can strongly affect their distribution, which will often influence the yield or efficiency of a process. Because of this, it is important to know how this interaction takes place. Friction coefficients are fundamental parameters for studying the movement and interaction of particles, especially when their concentration is high. The direct determination of these coefficients is often a complex task, since their measurement can be affected by a number of factors, such as the flatness of the surface and the shape of the particle. Because of this, there are few works that make the direct experimental determination of these coefficients. Studies relating these parameters to the characteristics of particles and surfaces are even rarer. In this context, this work aimed to obtain experimentally the coefficients of static and dynamic friction of particles with different physical, elastic and surface properties, and to test different methodologies for their determination. Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), fluorelastomer, nitrile rubber, alumina and porcelain particles were used in these tests. Two methodologies were used to determine the rolling friction coefficient: ASTM G194-08 (2008) and the oblique throw method proposed by Goya et al. (2014) and Neto and Cruz (2015). For the sliding friction coefficient, two other methodologies were used: the inclined plane method (Lima, 2017) and the method of determination from the analysis of data obtained by the inclined ramp method (Goya et al., 2014). Acrylic and glass surfaces were used to determine the friction coefficients for the particle-surface pairs. The results showed that there is an influence of surface and elastic properties on the coefficients. Furthermore, it was possible to verify that the applied method can also have an influence on the values of the coefficients. For rolling friction, for example, the different methods resulted in similar values only for particles with more uniform surfaces, indicating that care is needed in choosing the method when working with particles with less uniform surfaces. The present study was mainly useful in comparing direct methods for determining friction coefficients. However, further investigation of the influence of particle properties on these parameters is necessary, in order to enable the correlation of these variables.

Keywords: Friction coefficients, rolling, sliding, roughness, methods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagens de biopartículas.....	4
Figura 2 – Esquema ilustrativo da rugosidade (A) entre partículas e (B) partícula-superfície. .	7
Figura 3 – Rugosidade média.	8
Figura 4 – Perfil de superfície.	9
Figura 5 – Características de transmissão dos perfis de rugosidade e ondulação.	10
Figura 6 – Formação da Planicidade.	11
Figura 7 – Grau de esfericidade x grau de arredondamento.....	12
Figura 8 – Esquema para medição de resistência ao rolamento.....	15
Figura 9 – Esquema de uma rampa típica da norma.....	16
Figura 10 – Coeficiente de atrito de rolamento considerando o centro de massa da partícula.	18
Figura 11 – Esquema do método de lançamento oblíquo de esferas.....	18
Figura 12 – Forças que atuam sobre um corpo deformável que rola num plano inclinado.....	19
Figura 13 – Diagrama de forças dos experimentos utilizados para medição do coeficiente, utilizando plano horizontal (a) e inclinado (b).	23
Figura 14 – Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos mostrado no artigo de Goya et al., 2014.....	26
Figura 15 – ABS sem revestimento (A), ABS com uma camada de revestimento (B), ABS com duas camadas de revestimento de borracha (C), fluorelastômero (D), borracha nitrílica (E), alumina (F) e porcelana (G).	29
Figura 16 – Aparência do Software ImageJ.	30
Figura 17 – Aparência do Software ImagePro Plus.	31
Figura 18 – Equipamento de microscopia confocal.	32
Figura 19 – Relógio Apalpador para medição de planicidade.....	33
Figura 20 – Marcação dos pontos analisados na placa de acrílico.	33
Figura 21 – Rugosímetro.	35
Figura 22 – Medição com o SJ-210 e conexão a equipamentos relacionados.	35
Figura 23 – Equipamento para análise de coeficiente de atrito de rolamento pela norma ASTM G194-08 (2018).	37
Figura 24 – Equipamento para análise de coeficiente de atrito de rolamento método rampa inclinada.	38
Figura 25 – Equipamento para medição de coeficiente de atrito estático.	40

Figura 26 – Esquema de montagem dos aglomerados.	40
Figura 27 – Posicionamento de aglomerados na superfície de acrílico.....	42
Figura 28 – Posicionamento dos aglomerados para análise do coeficiente de deslizamento partícula-partícula.....	42
Figura 29 – Fluxograma de resumo da metodologia das superfícies	43
Figura 30 – Fluxograma de resumo da metodologia dos coeficientes	44
Figura 31 – Área analisada das partículas conforme aumento de foco.	47
Figura 32 – Imagens de microscopia confocal das superfícies das partículas de ABS sem recobrimento.....	49
Figura 33 – Imagens de microscopia confocal das superfícies das partículas de ABS com 1 camada de revestimento.....	49
Figura 34 – Imagens de microscopia confocal das superfícies das partículas de ABS com 2 camadas de revestimento.	49
Figura 35 – Imagens de microscopia confocal das superfícies das partículas de fluorelastômero.....	50
Figura 36 – Imagens de microscopia confocal das superfícies das partículas de nitrila.	50
Figura 37 – Imagens de microscopia confocal das superfícies das partículas de alumina.	51
Figura 38 – Imagens de microscopia confocal das superfícies das partículas de porcelana. ...	51
Figura 39 – Perfil de rugosidade da placa de acrílico utilizadas no método norma ASTM G194-08.....	53
Figura 40 – Perfil de rugosidade da placa de vidro utilizada no método norma ASTM G194- 08.....	53
Figura 41– Imagens de microscopia confocal da superfície de acrílico.....	54
Figura 42 – Imagens de microscopia confocal da superfície de vidro.	55
Figura 43 – Planicidade da placa de acrílico.	56
Figura 44 – Vista superior da placa de acrílico para teste de coeficiente de atrito de rolamento pela norma ASTM G194-08.....	56
Figura 45 – Planicidade da placa de vidro.....	57
Figura 46 – Vista superior da placa de vidro para teste de coeficiente de atrito de rolamento pela norma ASTM G194-08.....	57
Figura 47 – Coeficiente de atrito de rolamento analisados pelo método da norma ASTM G194-08 (2018).	59
Figura 48 – Perfil de contato entre partícula e superfícies.	62
Figura 49 – Demonstração das direções da partícula conforme elevação da rampa.	64

Figura 50 – Coeficiente de atrito de rolamento para ABS sem revestimento medidos pelo ImageJ no acrílico.....	69
Figura 51 – Coeficiente de atrito de rolamento para ABS sem revestimento medidos pelo alcance horizontal no acrílico.	70
Figura 52 – Coeficiente de atrito de rolamento para ABS sem revestimento no acrílico eliminando ângulos que tem distribuição irregular de forças.....	71
Figura 53 – Coeficiente de atrito de rolamento para partículas rígidas com velocidades retiradas pelo ImageJ em acrílico.	74
Figura 54 – Coeficiente de atrito de rolamento para partículas rígidas com velocidades retiradas pelo alcance horizontal em acrílico.	76
Figura 55 – Coeficiente de atrito de rolamento para partículas de ABS sem revestimento medidos pelo ImageJ no vidro.....	81
Figura 56 – Coeficiente de atrito de rolamento para partículas de ABS sem revestimento medidos pelo alcance horizontal no vidro.	82
Figura 57 – Coeficiente de atrito de rolamento para ABS sem revestimento no vidro eliminando ângulos que tem distribuição irregular de forças.....	82
Figura 58 – Dados de coeficiente de atrito de rolamento das demais partículas pelo método de análise do ImageJ na superfície de vidro com ângulo de 14° e comprimento de 20 cm fixos.	84
Figura 59 – Dados de coeficiente de atrito de rolamento das demais partículas pelo método de análise do alcance horizontal na superfície de vidro com ângulo de 14° e comprimento de 20 cm fixos.	85
Figura 60 – Comparativo entre as metodologias para o coeficiente de atrito de rolamento sobre a placa de acrílico.....	88
Figura 61 – Comparativo entre as metodologias para o coeficiente de atrito de rolamento sobre a placa de vidro.	88
Figura 62 – Médias dos ângulos de deslizamento de partículas sobre superfície acrílica.....	92
Figura 63 – Médias dos ângulos de deslizamento de partículas sobre superfície vítrea.	92
Figura 64 – Rotação do aglomerado de 3 partículas.	93
Figura 65 – Direção das partículas no deslizamento.	95
Figura 66 – Coeficiente de atrito estático partícula-superfície acrílica.	98
Figura 67 – Coeficiente de atrito estático partícula-superfície vítrea.....	98
Figura 68 – Médias dos ângulos de deslizamento de partículas sobre superfície de partículas.	100
Figura 69 – Coeficiente de atrito estático partícula-partícula.....	102

Figura 70 – Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos para partículas de ABS sem revestimento em acrílico.	103
Figura 71 – Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos para partículas de ABS com uma camada de revestimento em acrílico.....	104
Figura 72 – Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos para partículas de ABS com duas camadas de revestimento em acrílico.....	105
Figura 73 – Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos para partículas de fluorelastômero em acrílico.....	106
Figura 74 - Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos para partículas de nitrila em acrílico.	107
Figura 75 – Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos para partículas de alumina em acrílico.	108
Figura 76 – Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos para partículas de porcelana em acrílico.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ângulo, raiz quadrada da altura, tempo para percorrer a canaleta, alcance horizontal e três modos diferentes de determinação de velocidade da esfera de aço.....	26
Tabela 2 – Características das placas.	34
Tabela 3 – Medidas de diâmetro e circularidade das partículas com propriedades diferentes.	45
Tabela 4 - Dados de rugosidade média para partículas poliméricas com diferentes aproximações.....	46
Tabela 5 – Rugosidade das superfícies das placas.	52
Tabela 6 – Distância ($[cm] \pm \sigma$) percorrida para atrito de rolamento e coeficiente de atrito de rolamento ($\mu_r [] \pm \sigma$) segundo norma ASTM G194-08.	58
Tabela 7 – Velocidade média de rolamento – ABS sem revestimento $[m/s] \pm \sigma$ em acrílico..	65
Tabela 8 – Distância alcançada ($m \pm \sigma$) para ABS sem revestimento em acrílico.....	67
Tabela 9 – Coeficiente de atrito de rolamento em ImageJ e pelo alcance horizontal ($\mu_r [] \pm \sigma$) – ABS sem revestimento em acrílico.	68
Tabela 10 – Coeficiente de atrito de rolamento ($\mu_r [] \pm \sigma$) medidos pelo ImageJ em acrílico.	74
Tabela 11 – Coeficiente de atrito de rolamento ($\mu_r [] \pm \sigma$), medidos pelo alcance horizontal em acrílico.	75
Tabela 12 – Velocidade média de rolamento – ABS sem revestimento $[m/s] \pm \sigma$ em vidro. ..	77
Tabela 13 – Distância alcançada ($m \pm \sigma$) para ABS sem revestimento em vidro.	79
Tabela 14 – Coeficiente de atrito de rolamento em ImageJ e pelo alcance horizontal ($\mu_r [] \pm \sigma$) – ABS sem revestimento em vidro.	80
Tabela 15 – Valores dos coeficientes de atrito de rolamento ($\mu_{rpw} [] \pm \sigma$) para o ângulo de 14° e comprimento de 20cm.	83
Tabela 16 – Resultados da média das médias dos coeficientes de atrito de rolamento ($\mu_{rpw} [] \pm \sigma$) para todas as partículas obtidos pelo ImageJ – superfície acrílica.	85
Tabela 17 – Resultados da média das médias dos coeficientes para todas as partículas obtidos pelo alcance horizontal – superfície acrílica.....	86
Tabela 18 – Coeficiente de atrito de rolamento para comparativo entre os métodos.....	87
Tabela 19 – Média dos ângulos obtidos para atrito estático ($[^\circ] \pm \sigma$) dos aglomerados sobre superfície acrílica.....	90
Tabela 20 – Média dos ângulos obtidos para atrito estático ($[^\circ] \pm \sigma$) dos aglomerados sobre superfície vítrea.	91

Tabela 21 – Coeficientes de atrito estático dos aglomerados sobre superfície acrílica.....	96
Tabela 22 – Coeficientes de atrito estático dos aglomerados sobre superfície vítrea.	97
Tabela 23 – Média dos ângulos obtidos para atrito estático dos aglomerados sobre superfície de partícula.	99
Tabela 24 – Coeficiente de atrito de deslizamento (μ_{spp} [$\pm \sigma$]) partícula-partícula.	100
Tabela 25 – Comparativo entre os métodos para os valores encontrados do coeficiente de atrito de deslizamento em superfície acrílica.	110

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
a_{cm}	Aceleração de centro de massa	[m/s ²]
A	Aceleração do corpo	[m/s ²]
h	Altura	[m]
H	Altura da base utilizada para sustentar o equipamento	[m]
$A_{partícula}$	Área de uma partícula	[m ²]
A_c	Área do menor círculo circunscrito	[m ²]
A_p	Área projetada na posição de repouso	[m ²]
C_r	Circularidade	-
L	Comprimento	[m]
k'	Curvatura	-
d_i	Diâmetro do maior círculo em projeção, na posição de repouso	[m]
d_c	Diâmetro da menor circunferência que circunscreve a projeção	[m]
d	Distância	[m]
x	Distância de deformação de corpo	[m]
y	Distância horizontal	[m]
E_c	Energia Cinética	J
E_p	Energia potencial	J
E_s	Esfericidade	-
F	Força atuante	[N]
F_{at}	Força de atrito	[N]
F_r	Força de atrito de rolamento	[N]
F_{ate}	Força de atrito estático	[N]
N	Força normal	[m]
W	Força peso	[N]
m	Massa	[kg]
I	Momento de inércia	[kg m ²]
l_m	Percurso de medição	[m]
R	Raio	[m]
R'	Raio de curvatura	[m]
k	Raio de giração	[m]

R_{app}	Rugosidade aparente da partícula	[m]
Ra	Rugosidade média	[m]
Ra_p	Rugosidade média de partículas	[m]
Ra_w	Rugosidade média de superfícies	[m]
t	Tempo	[s]
v	Velocidade	[m/s]
V_{fcm}	Velocidade final em relação ao centro de massa	[m/s]
$V_{partícula}$	Volume de uma partícula	[m ³]
α	Aceleração angular	[rad/s ²]
β, θ	Ângulo de inclinação	°
μ	Coefficiente de atrito	-
μ_k	Coefficiente de atrito cinético	-
μ_s	Coefficiente de atrito de deslizamento	-
μ_{spw}	Coefficiente de atrito de deslizamento partícula-superfície	-
μ_{spp}	Coefficiente de atrito de deslizamento partícula-partícula	-
μ_r	Coefficiente de atrito de rolamento	-
μ_e	Coefficiente estático	-
λ_s	Filtro de Gauss que separa os componentes de ondulação e de ondas mais curtas presentes em perfil primário	-
λ_f	Filtro de Gauss que separa os componentes de ondulação e de ondas mais longas presentes em perfil primário	-
λ_c	Filtro de Gauss que separa os componentes de rugosidade e ondulação	-
ω	Velocidade angular	[rad/s]

SUMÁRIO

RESUMO	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. OBJETIVOS GERAIS.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. BIORREACTORES DE LEITO FLUIDIZADO	4
3.2. ATRITO.....	6
3.3. RUGOSIDADE	7
3.3.1. RUGOSÍMETRO	9
3.4. PLANICIDADE.....	10
3.5. ESFERICIDADE E CIRCULARIDADE.....	12
3.6. COEFICIENTES DE ATRITOS COMO PARÂMETROS DE ENTRADA.....	13
3.7. COEFICIENTE DE ATRITO DE ROLAMENTO	14
3.7.1. NORMA ASTM G194-08.....	15
3.7.2. MÉTODO DO LANÇAMENTO OBLÍQUO	18
3.8. COEFICIENTE DE ATRITO DE DESLIZAMENTO	23
3.8.1. PLANO INCLINADO.....	23
3.8.2. LANÇAMENTO OBLÍQUO	25
4. MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1. PARTÍCULAS.....	28
4.1.1. RECOBRIMENTO DAS ESFERAS DE ABS	29

4.2.	CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES	32
4.2.1.	CARACTERIZAÇÃO QUANTO À PLANICIDADE	32
4.2.2.	RUGOSIDADE DAS SUPERFÍCIES	34
4.3.	COEFICIENTE DE ATRITO DE ROLAMENTO.....	36
4.3.1.	MÉTODO DA NORMA ASTM G194-08, 2018	36
4.3.2.	MÉTODO RAMPA INCLINADA.....	37
4.4.	COEFICIENTE DE ATRITO DE DESLIZAMENTO	39
4.5.	FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA	42
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS	45
5.2.	CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS.....	52
5.3.	RESULTADOS DAS PLANICIDADES DAS PLACAS PARA NORMA ASTM G194-08.....	55
5.4.	COEFICIENTE DE ATRITO DE ROLAMENTO.....	58
5.5.	COEFICIENTE DE ATRITO DE DESLIZAMENTO.....	89
6.	CONCLUSÕES.....	111
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	113
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
	ANEXOS	118

1. INTRODUÇÃO

Processos que envolvem partículas sólidas são bastante utilizados em diversos ramos da engenharia, seja nas indústrias de produtos químicos, farmacêutica, alimentícia, bioquímica, petrolífera e até mesmo em tratamentos residuários em geral (Lopes et al., 2018; Soares, C.; Anciens, G.; Juliany, H.; Saldanha, 2015). Dentre os processos que envolvem partículas, podem-se citar aqueles em que ocorre sedimentação, cristalização, lixiviação, adsorção e troca iônica, transporte de lamas, separação e tratamento de efluentes (Ghodki e Goswami, 2017). Em todos esses processos, a escolha adequada e modelagem dos equipamentos são imprescindíveis, já que o comportamento fluidodinâmico do sistema operado depende de muitos fatores, como as interações do fluido com as partículas e destas entre si e com as superfícies do equipamento (Joseph et al., 2001; Zhang et al., 2005; Ruiz-Ângulo e Hunt, 2010). Nesse contexto, é relevante o estudo dessas interações a fim de garantir a máxima eficiência no processo.

As interações ocorrem por meio de colisões, atrito e adesão das partículas no sistema. As forças resultantes das colisões e de atrito são diretamente influenciadas pelas características superficiais, elásticas e mecânicas das partículas. Essas, por sua vez, muitas vezes não são consideradas nas equações de projeto, causando imprecisões nas previsões do modelo (Lopes et al., 2018). Pode-se citar o biorreator de leito fluidizado como exemplo de processo em que a complexidade da interação partícula-fluido e partícula-partícula é grande. Neste tipo de reator, as partículas são, usualmente, rugosas, macias e não-circulares.

Uma ferramenta muito usada no projeto de sistemas complexos é a Fluidodinâmica Computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) acoplada ao Método dos Elementos Discretos (DEM, do inglês *Discrete Element Method*). Neste tipo de simulação é possível prever a distribuição das partículas e a expansão do leito em biorreatores de leito fluidizado, auxiliando no projeto adequado destes equipamentos. Neste tipo de abordagem, é necessário o conhecimento de parâmetros relativos às colisões e atritos enfrentados pelas partículas no interior do sistema. No entanto, existe uma carência de dados na literatura quando se trata de partículas com alto grau de complexidade, como as encontradas nos biorreatores de leito fluidizado. Por causa disso, a maioria dos estudos de simulação faz uso de coeficientes genéricos, o que pode causar erros e imprecisões no projeto desses reatores (Melo, 2020; Ro e Nethling, 1994).

Tais erros são ainda mais críticos em sistemas densos, onde o movimento das partículas pode ser fortemente influenciado pelo atrito entre partículas. Isso ocorre porque há a dissipação de energia cinética das partículas, causada pelo contato das superfícies e suas rugosidades. Os parâmetros de entrada das simulações CFD-DEM usados na modelagem do atrito são os coeficientes de fricção, que são medidas adimensionais que expressam a oposição das superfícies de dois corpos em contato ao deslizarem um em relação ao outro (Lima e Souza, 2002). Quanto maior a rugosidade das partículas, maior a resistência à movimentação de um corpo sobre o outro, maior o atrito e, conseqüentemente, mais alto o valor do coeficiente de fricção. Estes coeficientes devem ser preditos corretamente a fim de evitar problemas de projeto e de operação de sistemas densos de partículas. Assim, a busca por valores experimentais de tais coeficientes é de extrema importância.

Logo, com intuito de estudar os fenômenos interfaciais de partículas com diferentes propriedades em escoamentos densos, foram investigados, neste trabalho, os coeficientes de fricção de deslizamento e de rolamento, visando contribuir com a modelagem deste tipo de sistema, principalmente quando as partículas possuem alta rugosidade e formato não esférico, assim como é o caso das biopartículas.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

No contexto apresentado na seção de Introdução, o objetivo geral deste trabalho foi estimar experimentalmente os coeficientes de atrito estático e dinâmico de partículas de diferentes propriedades físicas, elásticas e superficiais e tentar relacionar essas características com os coeficientes medidos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, teve-se, como objetivos específicos:

- a construção/readequação de equipamentos para medir parâmetros de fricção de rolamento e de deslizamento;
- a caracterização de propriedades superficiais, físicas e mecânicas das partículas e caracterização quanto à rugosidade e planicidade das superfícies utilizadas;
- a avaliação da influência das propriedades físicas e superficiais das partículas sobre os coeficientes de fricção;
- a verificação e comparação dos resultados dos diferentes métodos para a medição dos coeficientes.

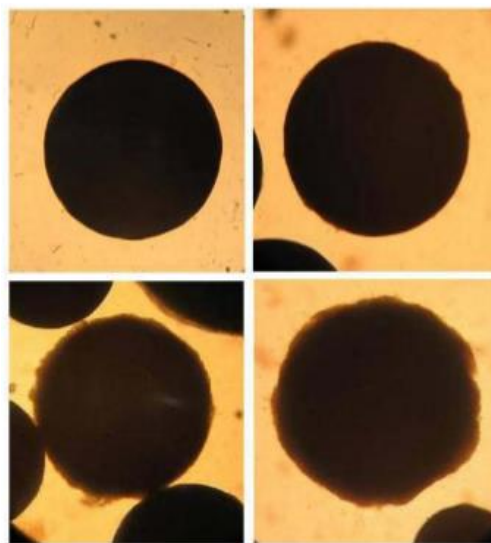
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. BIORREATORES DE LEITO FLUIDIZADO

A fluidização ocorre no momento em que um leito de partículas é submetido a um fluxo ascendente de fluido gás ou líquido, porém sem que haja o arraste do sólido (Levenspiel e Kunii, 1991). Os principais fatores que influenciam na ocorrência de fluidização do leito são o tamanho e a distribuição de tamanho dos sólidos, bem como a relação entre as densidades do fluido e do sólido. Para o caso dos sistemas líquido-sólidos trabalhado nesse projeto, sua fluidização é mais homogênea, enquanto que em sistema que tratam de gases como fluido, o grau de heterogeneidade é maior (Gebara, 2006).

Nos biorreatores de leito fluidizado, as partículas que fazem parte do leito são biopartículas, que são compostas por micro-organismos aderidos à superfície de uma partícula inerte que crescem pelo consumo de compostos orgânicos (substrato) presentes na fase líquida, tornando-se uma partícula bastante macia, deformável e rugosa. A ligação do biofilme às partículas não é uniforme (Figura 1), resultando em partículas com baixa esfericidade, de diversos tamanhos e densidades. Além disso, as diferentes propriedades elásticas contribuem para a mudança do comportamento fluidodinâmico (Ro e Neethling, 1994).

Figura 1 – Imagens de biopartículas.



Fonte: Ro e Neethling (1994).

Um dos conceitos que pode ser usado para classificar as partículas é sua característica superficial, podendo as partículas serem divididas em lisas e rugosas. Toda superfície, independente do seu método de preparação, possui irregularidades morfológicas. Superfícies muito rugosas tendem a apresentar área de contato muito menor do que a área de contato aparente, porém essas rugosidades causam o aumento da porosidade quando as partículas são vertidas em um fluido formando um leito (empacotamento solto) (Lopes et al., 2018). Na fluidização dessas partículas, há muita dissipação de energia exatamente pela grande rugosidade delas.

Já em relação ao tamanho das partículas, as menores apresentam alta área de contato por unidade de volume, logo as forças resultantes de interações se tornam comparáveis à magnitude de outras forças às quais a partícula está sujeita. As partículas maiores podem apresentar forças adesivas consideráveis caso possuam grande rugosidade superficial, resultantes das atrações inter-atômicas das asperezas (Prokopovich e Perni, 2011).

Partículas rugosas e com baixo coeficiente de restituição podem aderir umas nas outras, fazendo com que aglomerados de partículas se formem. Isso causa uma alteração na dinâmica do escoamento e a força exercida pelo fluido sobre as partículas pode ser maior do que a estimada por correlações clássicas para partículas esféricas individuais (Lopes et al., 2018).

A concentração de partículas em um meio fluido também influencia na quantidade de energia dissipada no meio, que, neste sentido, pode ser classificado como denso ou diluído. Esse fator é considerado importante, pois nos escoamentos densos, ou seja, aqueles que apresentam altas concentrações de partículas, a interação entre elas é forte, motivo pelo qual as colisões e atritos são importantes. Já nos escoamentos diluídos, as colisões e atritos são menos frequentes e, portanto, têm pouca interferência na fluidodinâmica do sistema, não sendo necessária a inclusão desses efeitos em sua modelagem. Neste caso, o movimento das partículas é controlado pelas forças interfaciais entre o fluido e as partículas, que são o arraste e a sustentação (Lopes et al., 2018).

Outro detalhe importante a se considerar na modelagem de biorreatores, são as forças hidrodinâmicas, comumente conhecidas por forças de lubrificação. Essas acontecem devido à resistência do fluido em “atrapalhar” a atração ou o afastamento de duas partículas que interagem entre si, funcionando como uma barreira em seu movimento intersticial entre as partículas e gerando gradientes de pressão e tensões viscosas. Apesar de esse efeito ser insignificante quando o fluido que separa as partículas é um gás, ele passa a ser bastante significativo quando

este fluido se trata de um líquido (Joseph et al., 2001; Zhang et al., 2005; Ruiz-Angulo e Hunt, 2010).

Apesar de vários fatores influenciarem na dinâmica do escoamento em biorreatores de leite fluidizado, o foco do presente trabalho foi no estudo dos fenômenos de interação entre as partículas e destas com as superfícies do equipamento, podendo gerar dados que possam ser aplicados para a modelagem desses reatores.

3.2. ATRITO

Um dos conceitos de atrito está ligado às micro-asperezas que se encontram nas superfícies dos corpos. O atrito acontece quando um corpo em repouso sobre uma superfície sofre a ação de uma força de direção paralela a esta superfície, aparecendo sobre este corpo uma força de mesma direção e sentido contrário: a força de atrito (Lima e Souza, 2002). A resistência do corpo a se mover é causada pelas rugosidades entre o corpo e a superfície.

As leis do atrito foram descritas por Amontons em 1699 e alguns anos mais tarde, manuscritos de 1495 de Leonardo da Vinci foram encontrados com observações semelhantes (Lima, 2017). Algumas afirmações encontradas nesses manuscritos estão destacadas a seguir.

1. A força de atrito é proporcional à carga aplicada;
2. A força de atrito é independente da área de contato aparente (POPOV, 2010; ASM HandBook, 1992).

Já em 1781, Coulomb realizando seus experimentos de atrito, confirmou as leis estabelecidas por Amontons e ainda propôs uma terceira envolvendo corpos sólidos:

3. Quando a rugosidade da superfície é quebrada e o movimento é iniciado, a força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

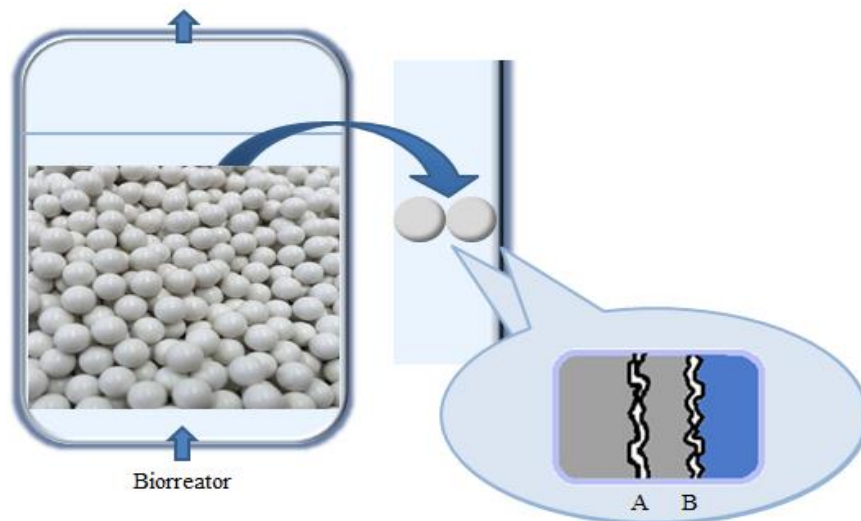
Assim, ficou determinado que a força necessária para se retirar o corpo do estado inercial é maior que do que a força exigida para o manter se deslocando, surgindo então a diferenciação de dois tipos de atrito: o atrito estático e o atrito cinético (GOSH, 1988; POPOV, 2010).

O atrito também pode ser interpretado como a força de contato que atua sempre que dois corpos entram em choque e há tendência ao movimento. Ele ocorre a partir da resistência

entre esses corpos quando um deles tende a deslizar sobre o outro, sendo assim, é dependente da rugosidade dos corpos envolvidos. Ele é definido pela relação entre a força tangencial decorrente que age sobre os corpos em contato e a força normal que mantém os dois corpos em contato (Ghodki e Goswami, 2017).

No caso de um reator, as partículas do leito sofrem atrito entre elas e com as superfícies internas do equipamento através de suas rugosidades, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Esquema ilustrativo da rugosidade (A) entre partículas e (B) partícula-superfície.



Fonte: Elaborada pela autora.

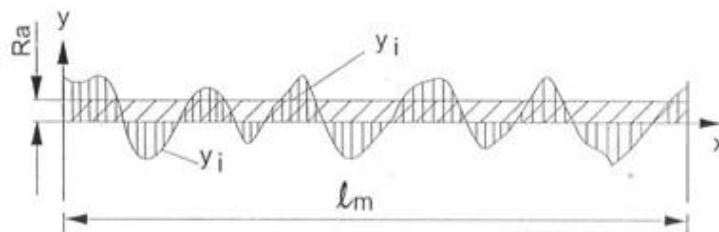
3.3. RUGOSIDADE

A rugosidade do material é caracterizada pelas microirregularidades existentes na superfície dele, quantificada pelas medidas relacionadas à altura ou largura das irregularidades. Para quantificar a rugosidade é usado um parâmetro conhecido por rugosidade média das partículas (usualmente identificado por Ra), o qual consiste na média aritmética dos valores absolutos de todos os desvios da superfície em relação ao plano médio na área amostrada (Melo, 2019). Quanto maior seu valor, maior será a aderência à superfície na qual a partícula é posicionada.

Nunes (2021) pesquisou sobre a rugosidade média e encontrou que esta é a média aritmética dos valores absolutos das “alturas” da rugosidade (y_i) em relação à linha média (mostrado na Figura 3), dentro do percurso de medição (l_m). Sua medida é então feita através da Equação 1.

$$Ra = \int_0^L \frac{1}{L} |y_i| dx = \frac{1}{n} \sum_i^n y_i \quad (1)$$

Figura 3 – Rugosidade média.



Fonte: Nunes, 2021.

O Ra é um valor médio, podendo às vezes, não dar indicação direta do estado da superfície. O emprego do parâmetro Ra é utilizado quando for necessário o controle de rugosidade continuamente nas linhas de produção, já que seu valor é fácil se obter (Nunes, 2021).

Como vantagem, o Ra é o parâmetro de medição mais aplicável nos processos de fabricação de superfícies, devido a sua grande utilização, sendo assim, a maioria dos equipamentos apresenta este parâmetro (de forma analógica ou digital eletrônica). Os riscos superficiais inerentes ao processo não alteram substancialmente o seu valor e para a maioria das superfícies, o valor da rugosidade neste parâmetro está de acordo com a curva de Gauss que caracteriza a distribuição de amplitude (Nunes, 2021).

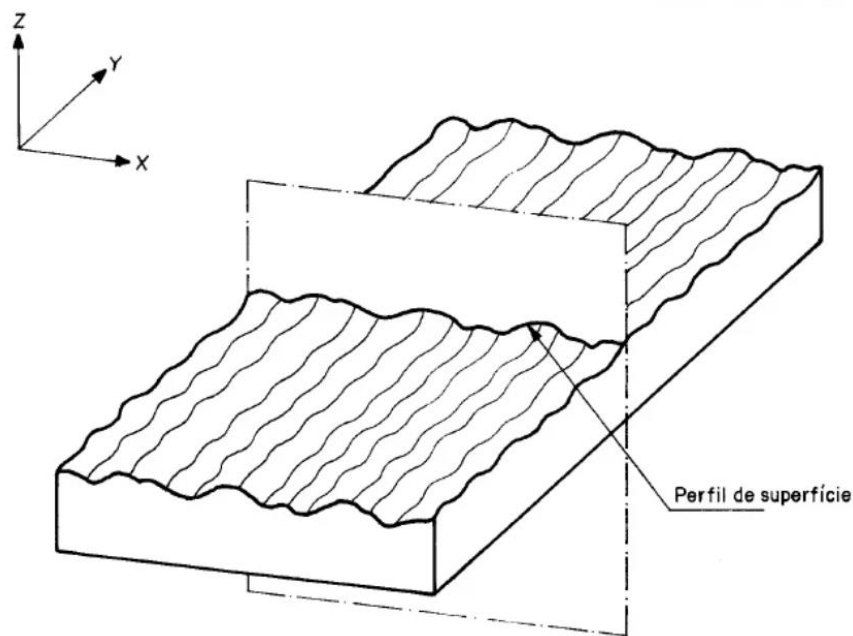
Como desvantagens, Nunes (2021) cita que o valor de Ra em um comprimento de amostragem representa a média da rugosidade, por isso, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando tal defeito. O valor de Ra não define a forma das irregularidades do perfil, dessa forma pode-se ter um mesmo valor de rugosidade média para superfícies originadas por processos de usinagem diferentes.

3.3.1. RUGOSÍMETRO

Uma das normas utilizadas pelo equipamento é a NBR ISO 4287:2002 que define os termos, definições e parâmetros para a determinação do estado da superfície (rugosidade, ondulação e perfil primário).

A norma detalha o perfil de superfície (Figura 4) que mostra o verdadeiro perfil de uma superfície a partir de um plano perpendicular traçado aleatoriamente. A região linear por onde esse plano passa, e que é analisada pelo rugosímetro, é chamada de perfil de superfície.

Figura 4 – Perfil de superfície.



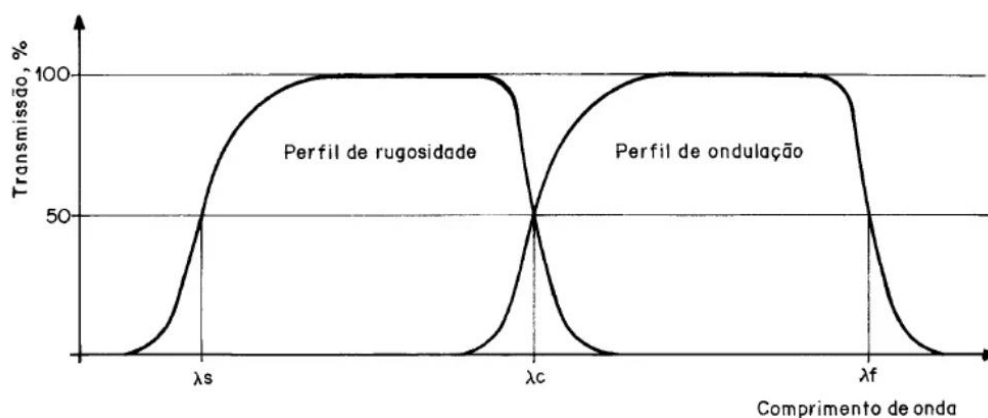
Fonte: ABNT NBR ISO 4287:2002.

A partir dele, o rugosímetro aplica os filtros de perfil linear de Gauss (definidos pela International Standard – ISO 16610-21:2011) que separa regiões através de comprimentos de ondas curtas e longas. Para isso, é preciso definir no equipamento o filtro de perfil λ_s , tratando-se de um valor referencial para confeccionar os gráficos de perfil primário. O mais comum de se utilizar para esse tipo de rugosímetro é $\lambda_s = 2,5\mu m$.

O perfil primário representa a base para o processamento digital do perfil de superfície e cálculo dos parâmetros de acordo com a ISO 4287:2002, caracteriza-se por ser o perfil de superfície apenas separando os degraus digitais verticais e horizontais.

O perfil de rugosidade é derivado do perfil primário pela eliminação dos componentes de comprimento de ondas longas, usando o filtro de perfil λ_c que é definido como sendo o filtro que separa os componentes de rugosidade e ondulação (Figura 5). Esse perfil serve como base para avaliação do perfil de rugosidade. Já o perfil de ondulação é derivado do perfil primário pela aplicação dos filtros λ_f , que é o filtro que separa os componentes da ondulação e os componentes das ondas mais longas presentes na superfície, e λ_c . A forma do perfil de ondulação deve ser inicialmente removida do verdadeiro perfil pelo método dos mínimos quadrados antes da aplicação do filtro de perfil λ_f . As características de transmissão dos perfis de rugosidade e ondulação são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Características de transmissão dos perfis de rugosidade e ondulação.



Fonte: ABNT NBR ISO 4287:2002.

3.4. PLANICIDADE

A acuracidade dos processos de fabricação de materiais e montagem utilizam os desempenhos como referência, ou seja, um corpo depende principalmente de uma referência de planicidade padrão para ser fabricado, especialmente no caso de superfícies lineares. Se a referência está fora das especificações, não se torna útil utilizar instrumentos sofisticados e de alta

precisão para medir esses materiais (Magalhães, 2006). Por isso, o objetivo principal da medição de planicidade é determinar o desvio de uma superfície com relação a um plano padrão.

As fontes de erros nos desvios de planicidade são atribuídas normalmente à presença de forças de corte no processo de usinagem, aos erros nas guias das máquinas, às variações térmicas durante o processo de usinagem, à falta de rigidez da máquina e a deformações devido ao próprio peso da peça (Magalhães, 2006).

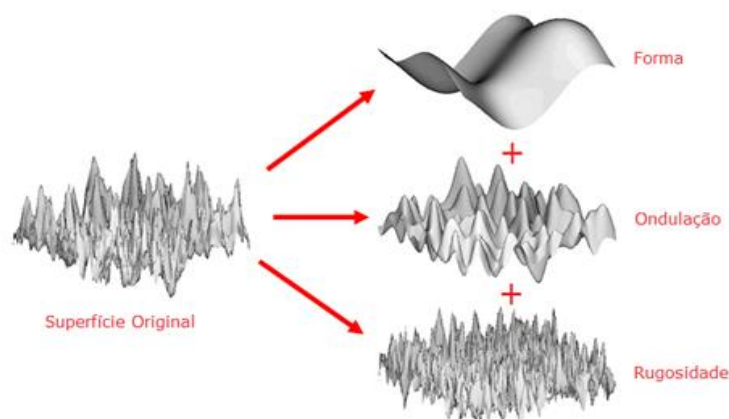
Durante a fabricação de chapas, por exemplo, os rolos de laminadores são imperfeitos e não exercem pressão uniforme sobre elas. Assim, o incremento no comprimento não é o mesmo em todos os pontos da secção das chapas. A variação gera tensões internas nelas produzindo deformações, chamadas de desvio de planicidade (Garcia et al. 1999).

Esses desvios da forma do objeto são definidos ao grau de variação das superfícies reais com relação às geometrias ideais que elas deveriam ter e que as definem. Desvios podem ser divididos em retilidade, circularidade, cilíndricidade e planicidade (Magalhães, 2006).

Não são apenas os materiais curvos, como as partículas, que apresentam rugosidades. Placas rígidas e lineares também possuem, porém essa rugosidade de superfície é um dos três componentes básicos que somados formam a planicidade real do material.

Na Figura 6 são mostrados os componentes da planicidade de uma superfície, sendo que a rugosidade (principal conceito estudado aqui) é uma das formas que interfere na planicidade de um material, já que há a dependência das microrregularidades que apontam picos e declínios, apesar de ser um parâmetro microscópico.

Figura 6 – Formação da Planicidade.



Fonte: Magalhães (2006).

Ao eliminar os erros de forma da superfície e as ondulações, pode-se garantir que apenas a rugosidade está interferindo em atritos de corpos.

3.5. ESFERICIDADE E CIRCULARIDADE

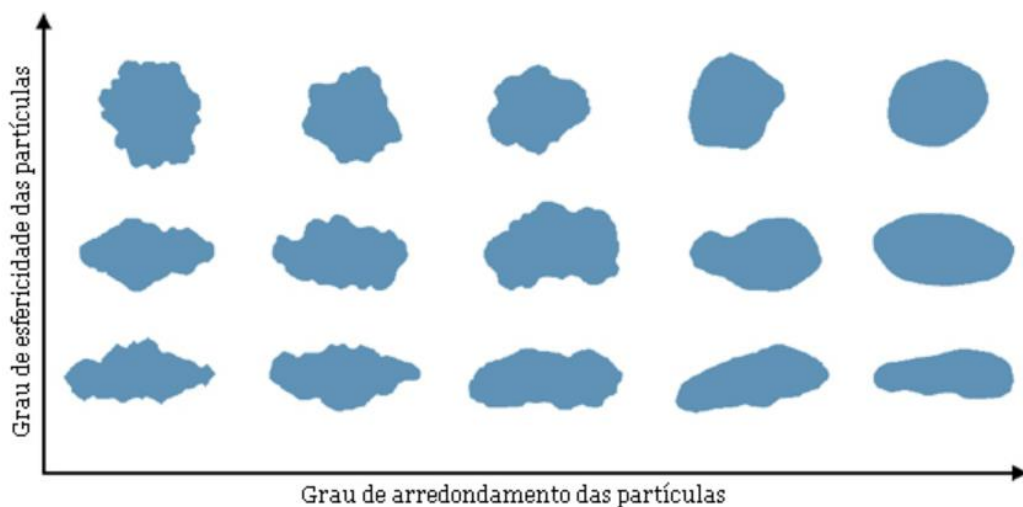
O termo arredondamento é uma expressão que refere aos graus de curvatura das arestas e vértices do contorno das partículas. A esfericidade é um termo frequentemente confundido com arredondamento. Esta é tratada por ser a forma perfeitamente esférica em um âmbito tri-dimensional, ou seja, uma esfera que possui um raio de curvatura constante em qualquer orientação. Assim, o verdadeiro grau de esfericidade de uma partícula só é mensurado corretamente comparando-se uma esfera perfeita de mesmo volume (Ribeiro e Bonetti, 2013).

Dentro as maneiras de se medir a esfericidade (E_s), que é um fator que indica o quanto a forma de um corpo se aproxima de uma esfera, se encontra a Equação 2.

$$E_s = \frac{d_i}{d_c} \cdot 100, \quad (2)$$

onde: d_i é diâmetro do maior círculo inscrito na projeção da semente, na posição de repouso; d_c é diâmetro da menor circunferência que circunscreve a projeção da semente na posição de repouso (Firmino et al., 2010). A Figura 7 mostra a relação entre arredondamento e esfericidade.

Figura 7 – Grau de esfericidade x grau de arredondamento.



Fonte: Ribeiro e Bonetti (2013).

Ribeiro e Bonetti (2013) citam ainda o autor Wandell, que também definiu esfericidade como sendo a relação entre a superfície de uma esfera que apresenta o mesmo volume de uma dada partícula e a superfície real dessa partícula. Sendo assim, a esfericidade é definida como:

$$E_s = \frac{\pi^{1/3} \cdot (6 \cdot V_p)^{2/3}}{A_{partícula}}, \quad (3)$$

em que $V_{partícula}$ é o volume da partícula e $A_{partícula}$ é área da partícula (Ribeiro e Bonetti, 2013).

Ribeiro e Bonetti (2013) observaram que uma análise tridimensional exige análise em instrumento óptico mais específico. Sendo assim, foram desenvolvidas equações para o cálculo de esfericidade em um âmbito bidimensional, o que gerou o parâmetro de circularidade. Este parâmetro tem como finalidade indicar o quanto a forma do produto em repouso se aproxima de um círculo. A circularidade é um fator que indica o quanto a forma de um produto se aproxima de um círculo, ou seja, de uma análise em 2D (Firmino et al., 2010).

Segundo Firmino et al. (2010), ela pode ser determinada pela Equação 4:

$$C_r = \frac{A_p}{A_c} \cdot 100, \quad (4)$$

em que A_p é a área projetada na posição de repouso e A_c é a área do menor círculo circunscrito.

Ribeiro e Bonetti (2013) ainda apresentaram as definições de circularidade classificadas por Wandell em 1935. O autor propôs dois termos: esfericidade da projeção e grau de circularidade. O primeiro é obtido através da razão entre o diâmetro de um círculo com a mesma área da partícula e o diâmetro do menor círculo circunscrito à mesma. O segundo é resultado da razão entre o perímetro de um círculo com a mesma área da partícula e o perímetro da partícula. Outra importante mensuração à circularidade é que equivale a medida da agudez dos cantos de um objeto (Pabis e Jaya, 1998).

3.6. COEFICIENTES DE ATRITOS COMO PARÂMETROS DE ENTRADA

Os valores de atrito entre os corpos são descritos em forma de coeficientes que servem como valores de entrada para modelagem de escoamento fluido-sólido, principalmente quando

se usa a Modelagem dos Elementos Discretos (DEM) para representar as partículas e suas interações. Para encontrar seus valores, Lima (2017) descreve que na literatura existem duas abordagens:

1. Abordagem de Calibração Bulk;
2. Abordagem de Medição Direta.

Na primeira, um experimento laboratorial é usado para medir as propriedades bulk do material e depois esses parâmetros são replicados numericamente, por simulações usando DEM. Os valores dos parâmetros DEM são alterados até que a resposta coincida com as propriedades bulk. O problema desse método foi descrito por Coetzee (Lima, 2017) que acredita que nesta abordagem o experimento pode ser influenciado por mais de um parâmetro, podendo não apresentar significados físicos e, por causa disso, mais de uma combinação de valores poderá apresentar a mesma resposta.

Na segunda abordagem, os valores dos parâmetros de entrada são medidos individualmente de forma direta, porém algumas propriedades não são tão fáceis de medir, principalmente quando se trata de partículas irregulares.

Frequentemente as duas abordagens podem ser utilizadas para obter valores mais próximos possíveis, visto que algumas propriedades, como diâmetro de partícula, são facilmente medidas, enquanto os coeficientes de atrito do tipo partícula-partícula, devido à dificuldade de medição, são determinados pela segunda abordagem.

3.7. COEFICIENTE DE ATRITO DE ROLAMENTO

Considerando um meio no qual as partículas são praticamente esféricas e de massa média m , deve-se levar em conta o rolamento de cada uma delas no leito e em contato com a superfície interna do reator, pois esse também é responsável pela mudança do comportamento fluidodinâmico do sistema. Por esse motivo, é de extrema importância o estudo do coeficiente de atrito de rolamento. A força de atrito de rolamento, por definição, é a força exercida na direção oposta ao rolamento de uma partícula quando em contato com uma superfície ou aglomerados de partículas, resistindo a esse rolamento (ASTM G194-08, 2018).

A resistência ao rolamento, ou atrito ao rolamento, para corpos esféricos ou cilíndricos, foi atribuída por McLaren e Tabor (1961) como sendo perdas de histerese elástica dos corpos

rolantes, que é a tendência de um sistema conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou, ou ainda, é a capacidade de preservar uma deformação efetuada por um estímulo, ou simplesmente retardo (Ketterhagen et al., 2010).

Em condições de tensão ou torção uniforme, assume-se que geralmente a energia dissipada pelo atrito é uma fração constante (o fator de perda de histerese) da energia elástica introduzida durante o ciclo. Em um experimento de esfera ou cilindro rolando em borracha, as expressões prediziam corretamente a dependência do atrito de rolamento na carga, diâmetro da esfera ou cilindro e constantes elásticas da borracha (Ketterhagen et al., 2010).

3.7.1. NORMA ASTM G194-08

Segundo a norma ASTM G194-08 (2018), o atrito de rolamento das esferas em superfícies horizontais é afetado pela rigidez da forma esférica, raio de curvatura, textura da superfície, filmes na superfície, natureza da superfície, entre outros fatores.

Um dos métodos utilizados para medição do coeficiente de atrito de rolamento é também definido pela norma. O procedimento descrito por ela consiste no rolamento de uma esfera através de uma rampa de alumínio e a observação da perda de energia cinética através da dissipação por meio da ação da força de atrito causada no corpo provocado pelo atrito entre as superfícies do corpo esférico e o plano horizontal onde a esfera passa a rolar depois que sai da rampa. O método é esquematizado na Figura 8.

Figura 8 – Esquema para medição de resistência ao rolamento.



Fonte: adaptada de Ketterhagen et al. (2010).

Para o coeficiente de rolamento deve-se considerar que a somatória das energias no alto da rampa, ou seja, no ponto A da Figura 8, é igual ao somatório das energias no final da rampa (ponto B da mesma figura). Desta forma, a energia potencial da partícula em A é igual à

sua energia cinética em B mais a somatória das perdas de energias por possível atrito da esfera com a rampa e mesmo do salto da esfera no final da rampa para a superfície analisada. Logo:

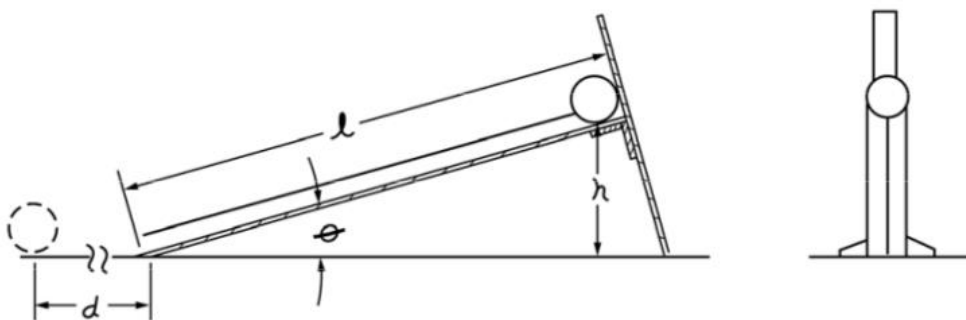
$$mgh_A = \frac{1}{2}mv_B^2 + \sum \text{Energias Perdidas}_{A \rightarrow B}, \quad (5)$$

em que m é a massa da esfera utilizada no teste, g é a aceleração gravitacional, h_A é a altura da rampa e v_B é a velocidade com que a esfera se encontra no final da rampa. Depois que a esfera entra em contato com o plano, ela passa a se atritar com a superfície até a sua parada no ponto C.

No entanto, a norma estabelece que se deva assumir que a perda de energia é significativamente pequena comparada com o total da energia do sistema, sendo assim, considerada nula. Isso acontece porque a norma ASTM G194-08 (2018) define que a rampa seja feita com material e dimensões específicos para reduzir este tipo de perda.

A Figura 9 retrata o esquema da rampa descrita na norma, sendo d a distância percorrida pela partícula de forma reta na superfície, l o comprimento da rampa, normatizado entre 13,4 e 14,5 cm, θ o ângulo, entre 110 a 120°, h a altura da rampa, entre 0,5 e 0,55 cm. O material sugerido para a rampa é alumínio 6061T6 acabado a frio, o que garante que o atrito seja mínimo.

Figura 9 – Esquema de uma rampa típica da norma.



Fonte: ASTM G194-08 (2018).

Portanto, de acordo com o esquema ilustrado na Figura 8, a velocidade inicial da esfera em B é $v_B = \sqrt{2gh}$. A partir deste ponto, a partícula passa a interagir com a superfície do experimento, ou seja, a esfera rola de B para C (Figura 8). Usando simples equações de movimento para o trecho B-C, tem-se que:

$$v_C^2 - v_B^2 = -2ad, \quad (6)$$

em que a é a aceleração da esfera, neste caso, negativa por se tratar de desaceleração. Como a velocidade da partícula em C é nula, já que está parada, obtêm-se:

$$v_B = \sqrt{2ad}. \quad (7)$$

A partir das Equações 5 e 7, encontra-se que a aceleração é dada por:

$$a = \frac{gh}{d}. \quad (8)$$

Visto isso, a força de atrito de rolamento F_r , por sua vez, pode ser descrita como:

$$F_r = ma = m \left(\frac{gh}{d} \right). \quad (9)$$

A força relacionada ao rolamento também pode ser então é escrita como:

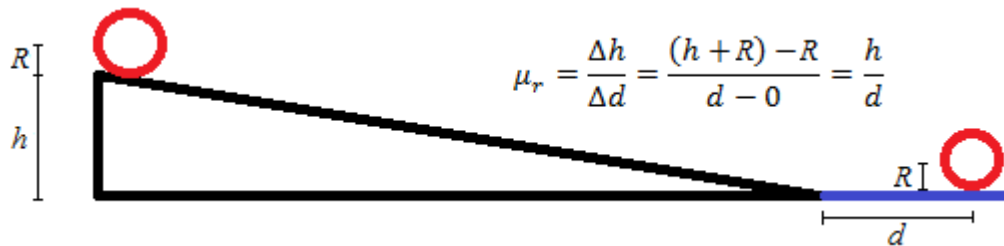
$$F_r = W\mu_r, \quad (10)$$

em que W é a força peso, dada pela multiplicação da massa da partícula pela aceleração da gravidade e μ_r é o coeficiente de rolante dada pela Equação 11 (Ketterhagen et al, 2010, ASTM, 2018).

$$\mu_r = \frac{h}{d}. \quad (11)$$

A altura considerada nessa norma é a reta perpendicular do ponto paralelo ao plano horizontal ao qual a rampa está apoiada até o ponto mais alto de contato da esfera com a rampa (Figura 9), ou seja, em A (Figura 8). Considerar o raio da esfera para a altura não seria um erro caso levasse em consideração o centro de massa da esfera. Neste caso, no início do rolamento, a partícula teria altura de $h + R$, em que R é o raio da partícula, e no final do rolamento o centro de massa estaria a uma altura R . Sendo assim, a equação para o coeficiente de atrito de rolamento não mudaria, como pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – Coeficiente de atrito de rolamento considerando o centro de massa da partícula.

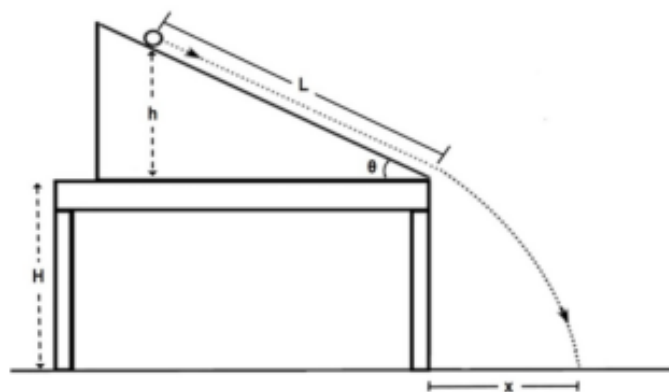


Fonte: Elaborada pela autora.

3.7.2. MÉTODO DO LANÇAMENTO OBLÍQUO

Outro método utilizado para medição desse coeficiente foi descrito em Goya et al. (2014) e Neto e Cruz (2015). Trata-se de um método mostrado na Figura 11, que utiliza o lançamento oblíquo para a determinação do coeficiente. O material esférico é posicionado a certa altura h da superfície horizontal onde o equipamento é colocado, sendo que este deve estar a uma altura H do chão. O ângulo θ formado é variado, bem como a distância L que o material esférico será posicionado.

Figura 11 – Esquema do método de lançamento oblíquo de esferas.

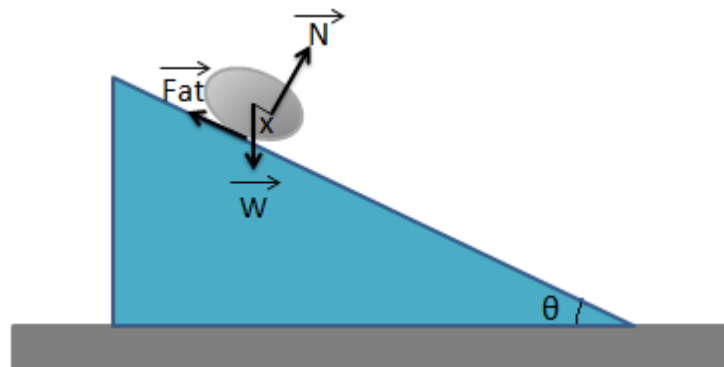


Fonte: Goya et al. (2014).

A equação do coeficiente de atrito de rolamento para esse método parte da aplicação da segunda lei de Newton, que envolve as forças que atuam sobre um corpo deformável que

rola em um plano inclinado, indicadas na Figura 12, onde N é a força normal, W é o módulo da força peso ($m \cdot g$ – sendo m a massa do corpo e g a aceleração da gravidade) e F_{at} é a força de atrito aplicada na direção contrária ao movimento de rolamento da esfera.

Figura 12 – Forças que atuam sobre um corpo deformável que rola num plano inclinado.



Fonte: Elaborada pela autora.

Devido à deformação do corpo, o ponto de aplicação da força N é deslocado para frente por uma distância x em relação ao ponto em que N atua no caso do corpo indeformável, ou seja, o centro de massa. Aplicando a segunda lei de Newton e considerando um rolamento puro, o qual teoricamente não apresenta deslizamento, tem-se que:

$$W \sin \theta - F_{at} = m \cdot a_{cm}, \quad (12)$$

onde a_{cm} é a magnitude da aceleração do centro de massa do corpo em relação a um referencial inercial e θ é o ângulo de inclinação da rampa. O centro de massa do corpo também se desloca para frente caso ele não seja completamente esférico.

A força de atrito provoca um torque sobre o corpo que o faz girar no sentido horário. Levando que conta esse sentido como positivo e tomando como referência o centro de massa do corpo, pode-se aplicar segunda lei de Newton para a rotação, obtendo-se:

$$F_{at}R - Nx = I\alpha = Mk^2\alpha, \quad (13)$$

em que onde R é o raio da seção circular do corpo, I é o momento de inércia do corpo, α é a aceleração angular da esfera e k é o raio de giração.

O raio de giração é definido como sendo a tendência de um material girar em uma direção x de um eixo cartesiano. Ele é calculado como sendo a raiz quadrada da relação entre o momento de inércia e a área da superfície e é definido como sendo:

$$k^2 = \frac{2R^2}{5} \text{ para esferas,} \quad (14)$$

$$k^2 = \frac{R^2}{2} \text{ para cilindros} \quad (15)$$

e

$$k^2 = R^2 \text{ para anéis.} \quad (16)$$

Isolando F_{at} da Equação 13, tem-se:

$$F_{at} = \frac{Mk^2\alpha + xP\cos\theta}{R}. \quad (17)$$

Como se trata de um plano inclinado, a força normal é dividida em duas coordenadas. Sabendo que $\alpha = a/R$ e que $x/R = \mu_r$. Substituindo-se estas definições na Equação 17, obtém-se:

$$a_{cm} = g(\sin\theta - \cos\theta\mu_r) - \frac{k^2}{R^2}a. \quad (18)$$

Para uma esfera rígida, sua aceleração é considerada a aceleração do centro de massa, por isso $a = a_{cm}$. Sabendo também que a aceleração do centro de massa de uma esfera é representada pela equação de Torricelli do movimento uniformemente variado, onde a aceleração da gravidade g apresentada pela componente de aceleração do corpo na direção x , a_{cm} pode ser escrita como:

$$a_{cm} = \frac{V_{f_{cm}}^2 \sin\theta}{2h}, \quad (19)$$

em que $V_{f_{cm}}$ é a velocidade em relação ao centro de massa na qual a esfera sai da rampa inclinada e h é a altura de onde ela partir, transformando energia potencial em cinética. Pode-se isolar o termo do coeficiente de atrito de rolamento para encontrar a equação correspondente a sua medição:

$$\mu_r = \left[1 - \left(\frac{R^2 + k^2}{R^2} \right) \frac{V_{f_{cm}}^2}{2gh} \right] \tan\theta, \quad (20)$$

sendo a Equação 20 utilizada para calcular o coeficiente de atrito de rolamento através do método apresentado por Goya et al. (2014) e Neto e Cruz (2015).

Para facilitar os cálculos, Neto e Cruz (2015) considerou que:

$$\frac{R^2 + k^2}{R^2} = \begin{cases} \frac{7}{5} & \text{para uma esfera,} \\ \frac{3}{2} & \text{para um cilindro,} \\ 2 & \text{para anel.} \end{cases} \quad (21)$$

Para encontrar a velocidade com que a esfera deixa a rampa inclinada, Goya et. al (2014), utilizou três métodos de medição. O primeiro foi a partir de 3 sensores fotoelétricos ligados a um cronômetro digital. Esse método possibilita a calibração do sistema de detecção, melhorando a precisão da medida. Goya utilizou um trilho, ou canaleta de plástico, de 2 metros de comprimento (L visto na Figura 11) como superfície de rolamento. O primeiro sensor foi posicionado a 12,5 cm da posição inicial de rolamento, o segundo, a 50,0 cm e o terceiro, a 200 cm.

A escolha das distâncias foi considerada de modo que o sensor posterior ficasse posicionado a uma distância quatro vezes maior do que a distância do sensor anterior, o que simplificou a calibração, já que bastava conseguir que o cronômetro referente a um sensor posterior marcasse o dobro do tempo (t) do cronômetro do sensor anterior.

Para a determinação da velocidade final ($V_{sensores}$) utilizando os sensores, admitiu-se o movimento uniformemente variado, com velocidade inicial nula ($V_0 = 0$) nas equações do deslocamento e da velocidade em função do tempo. Eliminando a variável de aceleração comum nas duas equações, obteve-se uma equação simples da velocidade no fim da canaleta, sendo assim, as equações do MUV (movimento uniformemente variado) são apresentadas e desenvolvidas:

$$V_F = V_0 + at, \quad (22)$$

e

$$S = S_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2, \quad (23)$$

em que $V_F = V_{sensores}$ é a velocidade final marcadas pelos sensores, S_0 é a posição inicial da rampa onde a esfera é posicionada, ou seja, considerado na posição zero, S é a posição final da esfera antes de sair da rampa, ou seja, o comprimento L da rampa, a é a aceleração do corpo e t é o tempo que o corpo leva para percorrer a rampa toda. Desenvolvendo a Equação 22, com a velocidade inicial zerada, tem-se que $a = v_F/t$. Substituindo na Equação 23, encontra-se a Equação 24.

$$V_{sensores} = \frac{2L}{t}. \quad (24)$$

O segundo modo que Goya utilizou para calcular a velocidade da esfera no instante em que ela deixa a canaleta, foi através do alcance horizontal X (Figura 11). Trata-se de um movimento em duas dimensões em que o resultado é medido através das composições de um movimento retilíneo uniforme na direção horizontal (eixo x) com um movimento retilíneo uniformemente variado na vertical (eixo y).

Isola-se a variável tempo (t) da equação do movimento uniforme e a substitui na equação do movimento vertical, além de somar os termos e isolar a variável velocidade. Logo, a equação que determina a velocidade com que a esfera sai da rampa através do alcance horizontal é:

$$V_{alcance_x} = \frac{X}{\cos \theta} \sqrt{\frac{g}{2(H - X \tan \theta)}}. \quad (25)$$

Na terceira metodologia, considera-se que a esfera não sofre deslizamento e há atrito durante o rolamento, admitindo, então, a conservação de energia mecânica. Assim, é considerado que um corpo abandonado de uma altura h , desce rolando num plano inclinado e toda a energia potencial (E_p) que a esfera possuía no início do movimento é transformada em energia cinética (E_c) linear e angular da esfera.

Assim, a velocidade é, então, descrita como:

$$\frac{1}{2}mV_{cm}^2 + \frac{1}{2}I_{cm}\omega^2 = mgh, \quad (26)$$

em que V_{cm} é a velocidade do centro de massa, I_{cm} é o momento de inércia do corpo e ω é a velocidade angular da esfera. Considerando o momento de inércia de uma esfera e relacionando a velocidade linear com a angular, considerando que não haja deslizamento, obtém-se a equação que expressa a velocidade final da esfera pela conservação que Goya utilizou em seus experimentos:

$$V_{energia} = \sqrt{\frac{10}{7}gh}. \quad (27)$$

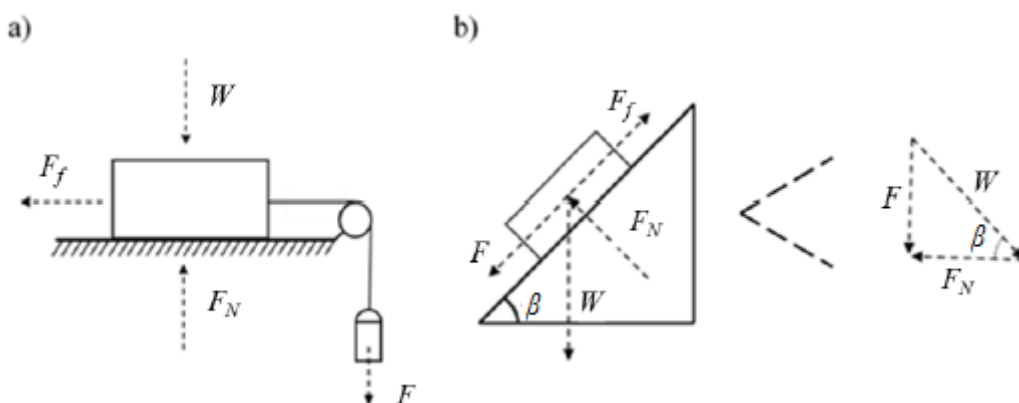
3.8. COEFICIENTE DE ATRITO DE DESLIZAMENTO

Uma das observações feitas por Coulomb em relação à força de atrito é: “a força necessária para se retirar o corpo da inércia é maior do que a força exigida para mantê-lo deslocando” (Ghosh, 1988; Popov, 2010). Sendo assim, é possível definir dois tipos de atrito: o atrito estático, μ_s , também conhecido por atrito de deslizamento, e o atrito cinético, μ_k . A força de atrito estático é a força que atua sobre o corpo em repouso e dificulta ou impossibilita que ele inicie o movimento, enquanto que a força de atrito cinético ou dinâmico é aquela que surge em oposição ao movimento de objetos que estão se movendo (Ghosh, 1988).

3.8.1. PLANO INCLINADO

Os coeficientes de atrito cinético e estático podem ser medidos a partir de dois experimentos, um de plano horizontal e outro de plano inclinado, ilustrados na Figura 13. Segundo Chaudhuri e Hutchison (2005), esses testes levaram a valores de coeficientes diferentes.

Figura 13 – Diagrama de forças dos experimentos utilizados para medição do coeficiente, utilizando plano horizontal (a) e inclinado (b).



Fonte: Adaptada de Gosh (1988).

Para o plano inclinado, os valores encontrados para o coeficiente estático foram ligeiramente inferiores quando comparados com o plano horizontal. Isso provavelmente aconteceu porque, na inclinação, pode ocorrer uma distribuição irregular das forças no corpo, fazendo com

que o movimento do bloco ocorra de forma precoce. Já para o coeficiente cinético, os autores observaram que, mesmo variando os ângulos de inclinação e a carga aplicada, os resultados encontrados foram muito próximos.

No plano horizontal, os coeficientes de atritos cinético (μ_k) e estático (μ_s) para um conjunto de partículas podem ser calculados da seguinte forma (Lima, 2017):

$$\mu_k = \frac{F}{mg} - \frac{a}{g}, \quad (28)$$

$$\mu_s = \frac{F}{mg}, \quad (29)$$

em que F é a força pela qual o dispositivo é puxado, sendo isto feito com auxílio de um outro corpo e pela gravidade, no caso do plano horizontal, e somente pela gravidade, no caso do plano inclinado; m é a massa o bloco; a é a aceleração do corpo deslizando e g é a aceleração da gravidade. Já para o plano inclinado, os coeficientes de atritos cinético e estático para um conjunto de partículas podem ser calculados da seguinte forma (Lima, 2017):

$$\mu_k = \tan \beta - \frac{a}{g} \sec \beta, \quad (30)$$

$$\mu_s = \tan \beta, \quad (31)$$

em que β é o ângulo formado a partir do momento que o conjunto de partículas “rompe” o contato entre as rugosidades das superfícies e desliza.

É importante ressaltar que, em se tratando de esferas, uma forma de evitar que haja o seu rolamento, é colar umas às outras de forma a garantir que elas deslizem sobre o plano inclinado (Lima, 2017).

Ainda relacionado com o comparativo entre os métodos, Li et al. (2005) e Chen et al. (2015), utilizando esferas de vidro sobre uma chapa do mesmo material, encontraram valores também diferenciados. Enquanto o primeiro realizou as medidas usando o método do plano horizontal, o segundo, usou o método do plano inclinado, encontrando valores ligeiramente inferiores aos obtidos pelo primeiro.

A norma ASTM D4918-97 (2007) determina esses coeficientes utilizando o plano inclinado, enquanto que a norma ASTM D4917-97 (2002) usa o plano horizontal. Os métodos descritos nessas normas se baseiam em um procedimento para a determinação do coeficiente de atrito estático e cinético de um papel medido ao deslizar contra si mesmo no processo de

impressão em impressora. No entanto, a norma para plano inclinado não pode ser utilizada para medição do coeficiente de atrito cinético, enquanto que a norma para plano horizontal pode definir o valor dos dois tipos de coeficientes, sendo eles obtidos diretamente a partir da resistência ao movimento tangencial e do peso aplicado pressionando duas folhas de papel juntas.

3.8.2. LANÇAMENTO OBLÍQUO

Ainda para o coeficiente de rolamento, Goya et al. (2014) percebeu que, no caso de haver a conservação de energia mecânica, como a Equação 27 sugere, a velocidade de rolamento de uma esfera é dependente linearmente do quadrado da altura do plano inclinado. Esse comportamento da velocidade indica a conveniência de se montar uma tabela em função da raiz quadrada da altura pelos três modos de se determinar a velocidade final da partícula na saída do trilho. Assim, é necessário que para cada ângulo de inclinação, meçam-se a altura h , o alcance horizontal e as velocidades.

Em um experimento de Goya et al. (2014), foi utilizado uma esfera de aço de massa $m = 0,04463$ kg e raio $R = 0,01111$ m, além de uma canaleta de plástico perfil 5,0 cm x 2,0 cm x 210,0 cm. Após realizar o experimento, os autores montaram uma tabela apresentada na Tabela 1, em que as quatro primeiras colunas mostram os dados obtidos diretamente do experimento, as três últimas colunas mostram os resultados obtidos dos cálculos das velocidades no final da canaleta, conforme as Equações 24, 25 e 27, respectivamente.

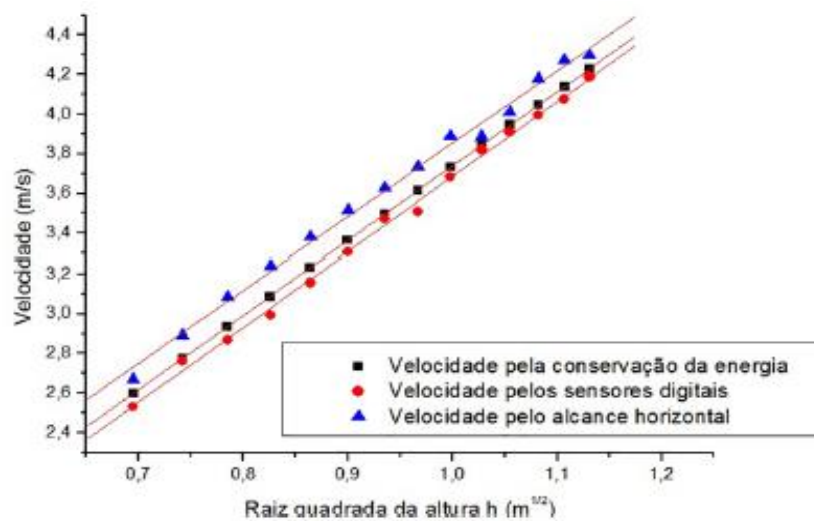
Depois, Goya et al. (2014) verificaram que uma maneira simples de analisar esses dados era traçar o gráfico das velocidades em função da raiz quadrada da altura no trecho em que os dados se aproximam de uma reta, como apresentado na Figura 14. Em algum ponto dessa reta, observaria um desvio que indicaria o ângulo onde a partícula passaria a deslizar ao invés de rolar.

Tabela 1 – Ângulo, raiz quadrada da altura, tempo para percorrer a canaleta, alcance horizontal e três modos diferentes de determinação de velocidade da esfera de aço.

θ (°)	$h^{1/2}$ (m ^{1/2})	t (s)	X (m)	$V_{sensores}$ (m/s)	$V_{alcance}$ (m/s)	$V_{energia}$ (m/s)
14,0	0,695	1,580	0,957	2,532	2,671	2,599
16,0	0,742	1,448	0,992	2,762	2,892	2,773
18,0	0,785	1,395	1,010	2,867	3,087	2,936
19,9	0,826	1,337	1,011	2,992	3,241	3,089
21,9	0,864	1,267	1,004	3,157	3,383	3,232
23,9	0,900	1,210	0,991	3,306	3,516	3,367
25,9	0,935	1,153	0,970	3,469	3,627	3,496
27,9	0,967	1,141	0,946	3,506	3,732	3,617
29,9	0,998	1,086	0,928	3,683	3,888	3,732
31,9	1,028	1,047	0,886	3,820	3,887	3,842
33,8	1,055	1,023	0,860	3,910	4,010	3,945
35,8	1,082	1,001	0,836	3,996	4,179	4,046
37,8	1,107	0,982	0,804	4,073	4,272	4,139
39,8	1,131	0,955	0,766	4,188	4,296	4,230
41,7	1,154	0,928	0,735	4,310	4,404	4,314
43,7	1,175	0,921	0,707	4,343	4,574	4,395
45,7	1,196	0,876	0,675	4,566	4,683	4,472
47,6	1,215	0,843	0,651	4,745	4,968	4,544
49,6	1,234	0,834	0,620	4,796	5,145	4,613
51,5	1,251	0,808	0,583	4,950	5,126	4,678

Fonte: Goya et al. (2014)

Figura 14 – Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos mostrado no artigo de Goya et al., 2014.



Fonte: Goya et al. (2014).

Goya et al. (2014) ainda observou que, quando a esfera acelera descendo a canaleta, sua velocidade angular aumenta para manter a condição de não deslizamento, isso é, a força de atrito gera um torque em relação ao eixo que passa pelo centro de massa. Sendo assim, descrevendo 2ª lei de Newton linear e a 2ª lei de Newton rotacional, tem-se:

$$mg\text{sen}\theta - F_{at_e} = ma_{cm} \quad (32)$$

$$F_{at_e} \cdot R = I_{cm} \cdot \frac{a_{cm}}{R}, \quad (33)$$

em que a_{cm} é a aceleração do centro de massa, R e I_{cm} são o raio e o momento da esfera no centro de massa. Eliminando a_{cm} e considerando o momento de inércia específico da esfera, encontra-se facilmente a expressão que determina a força de atrito estático (F_{at_e}) sobre a esfera, que rola sem deslizamento em um plano inclinado:

$$F_{at_e} = \frac{2}{7} mg\text{sen}\theta. \quad (34)$$

A condição de não deslizamento corresponde à situação em que a força de atrito é menor do que o produto do coeficiente de atrito estático pela força normal. Goya et al. (2014) ainda estabelece que no início do deslizamento, deve-se igualar as duas equações que envolvem a força de atrito para determinar o coeficiente de atrito estático em função da inclinação da canaleta, sendo assim (Silva, 2003):

$$\mu_e = \frac{2}{7} \tan \theta. \quad (35)$$

4. MATERIAIS E MÉTODOS

As medidas de coeficientes de atrito estático e coeficientes de atrito de rolamento realizados pelo método da rampa inclinada foram feitas no Laboratório de Caracterização e Colisão de Partículas, da área de Controle Ambiental, do Departamento de Engenharia Química (DEQ), da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Já parte da caracterização das superfícies e as medidas do coeficiente de rolamento método realizado pela norma ASTM G194-09 (2018) foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Superfícies Metálicas, do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) da mesma universidade.

Também houve participação do Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) da mesma universidade, onde foram analisadas as superfícies das esferas e superfícies utilizadas através de microscopia confocal.

4.1. PARTÍCULAS

Sete diferentes partículas rígidas foram usadas neste estudo, sendo elas:

- ABS sem revestimento (Figura 15.A);
- ABS com 1 camadas de revestimento de borracha (Figura 15.B);
- ABS com 2 camadas de revestimento de borracha (Figura 15.C);
- Fluorelastômero (Figura 15. D);
- Borracha nitrílica (Figura 15.E);
- Alumina (Figura 15.F);
- Porcelana (Figura 15.G).

Figura 15 – ABS sem revestimento (A), ABS com uma camada de revestimento (B), ABS com duas camadas de revestimento de borracha (C), fluorelastômero (D), borracha nitrílica (E), alumina (F) e porcelana (G).



Fonte: Elaborada pela autora.

4.1.1. RECOBRIMENTO DAS ESFERAS DE ABS

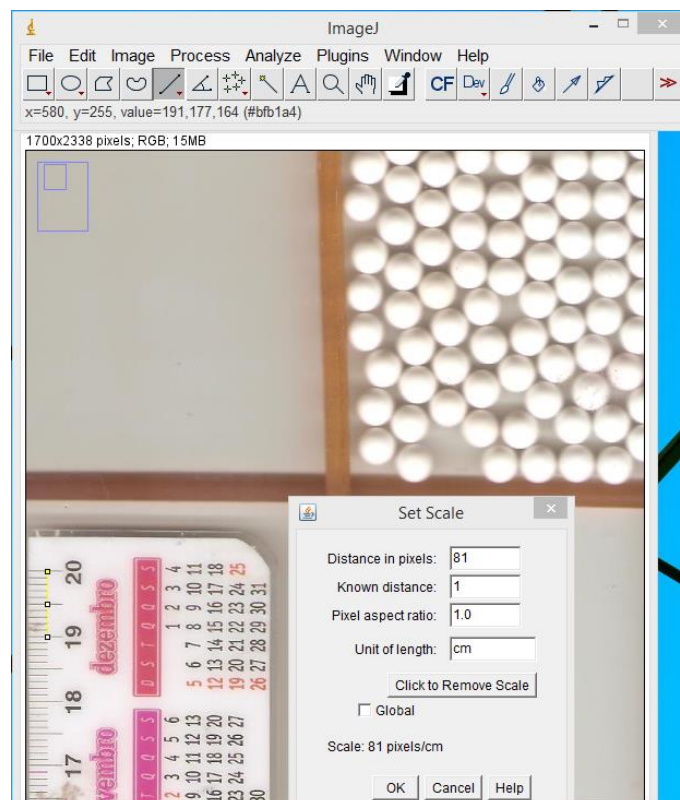
O processo de recobrimento das esferas de ABS com spray de borracha tem por objetivo avaliar a influência de irregularidades em suas superfícies em escoamento sólido-líquido em relação ao atrito devido o recobrimento ser feito com material que deixa a superfície bastante rugosa.

As esferas de ABS (Figura 15.A) foram revestidas com borracha líquida de alta elasticidade comercializada na forma de spray na cor cinza da marca HM RUBBER[®]. Para aplicar o spray sobre as partículas, colocou-se as esferas em um recipiente plástico de dimensões 50x30 cm². Foi aplicado um jato de tinta e as deixou secando por 2 horas. Em seguida, foram agitadas e novamente recobertas (Figura 15.B). Parte das esferas recebeu uma segunda camada uniforme (Figura 15.C) para produzir outro tipo de partícula a ser analisada.

4.1.2. CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS

A metodologia adaptada por Lopes et al. (2018) foi utilizada para as medidas de diâmetro. As partículas foram distribuídas sobre a superfície plana de uma impressora scanner da marca HP® modelo Deskjet F4180 de modo a não se tocarem e então digitalizadas. Depois, as imagens foram tratadas com o software ImageJ (Figura 16), dando como referência para o programa a medida de uma régua colocada ao lado das partículas para garantir que estas e as partículas estavam em mesmo foco. As áreas projetadas das partículas foram então convertidas em diâmetros equivalentes e feita a média.

Figura 16 – Aparência do Software ImageJ.

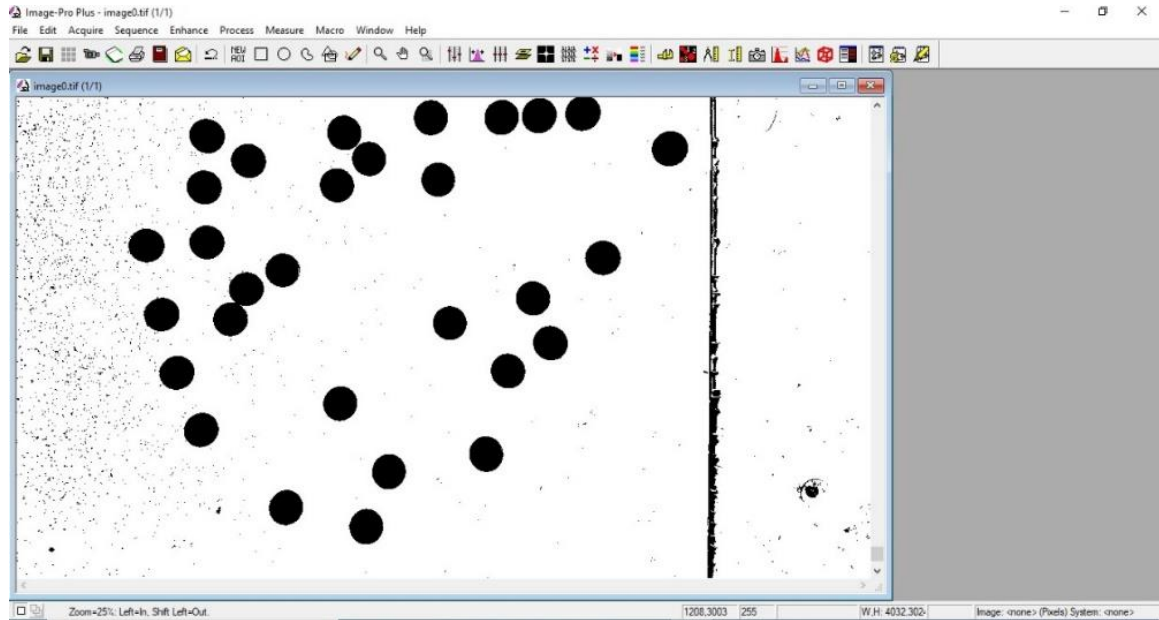


Fonte: Elaborada pela autora

A segunda medida feita com as partículas foi de circularidade. Os dados de circularidade das partículas foram obtidos a partir de imagens no software ImagePro Plus (Figura 17). Neste caso, as imagens foram transformadas em imagens binárias com câmera de ultra foco posicionada perpendicularmente em relação ao plano a uma distância aproximada de 10 cm. A

circularidade para cada tipo de partícula foi obtida fazendo a média dos valores obtidos pelo software.

Figura 17 – Aparência do Software ImagePro Plus.



Fonte: Elaborada pela autora.

Já a rugosidade média das partículas foi medida pela técnica de microscopia confocal no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). O microscópio confocal é um microscópio óptico que se baseia no uso de compostos fluorescentes que, ligados a estruturas específicas, determinam sua localização celular. A fonte de luz do microscópio confocal é constituída por algumas linhas de lasers, as quais se movem através de um *scanner* de modo a focalizar a amostra linha por linha. Com a excitação do laser, a amostra emite fluorescência em outro comprimento de onda, sendo esse lido pelos diferentes detectores. O microscópio usado foi o Olympus LEXT OLS 4000 (Figura 18). A rugosidade média (Ra) foi calculada para cada grupo de partículas em cada uma das ampliações de 5, 10 e 20 vezes.

Figura 18 – Equipamento de microscopia confocal.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES

4.2.1. CARACTERIZAÇÃO QUANTO À PLANICIDADE

As superfícies utilizadas nesse projeto, assim como todas existentes, não se apresentam totalmente planas, sendo então necessário um estudo da interferência do plano no movimento das partículas, a fim de se eliminar o máximo possível a interferência dessa variável sobre o rolamento das partículas e, conseqüentemente, o erro de medição do coeficiente. Para isso, foi realizado o ensaio de planicidade das superfícies de acrílico e vidro com a utilização de equipamento Relógio Apalpador da marca Digimess[®] como mostrado na Figura 19.

Neste procedimento, as placas analisadas foram inicialmente marcadas com caneta esferográfica pela superfície contrária à analisada em quadrados de 1 cm² (Figura 20) e apoiada diretamente sobre a mesa de granito que serve como um desempenho, o qual deve ser nivelado segundo norma ABNT NBR NM 103:1998.

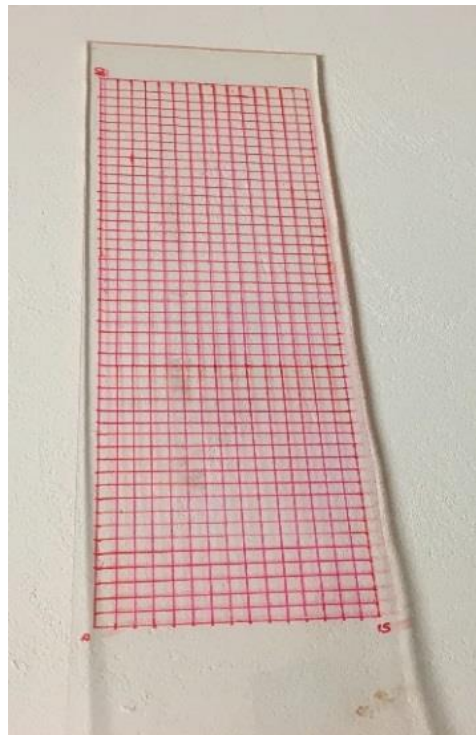
Os dados foram obtidos com o relógio apalpador centesimal na junção as linhas horizontais (cartesiano x) e verticais (cartesiano y) da placa. A planicidade é o valor do relevo ou declínio que há em cada um desses pontos, sendo este então o ponto em z.

Figura 19 – Relógio Apalpador para medição de planicidade.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 20 – Marcação dos pontos analisados na placa de acrílico.



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 2, encontram-se as medidas das placas e as áreas selecionadas para o teste de planicidade, sendo considerado o eixo x como o comprimento e o eixo y como a largura.

Tabela 2 – Características das placas.

Placa	Comprimento [cm]	Largura [cm]	Espessura [mm]	Área Analisada [cm²]
Acrílico	80	20	10	50x15
Vidro	75	60	6	50x30

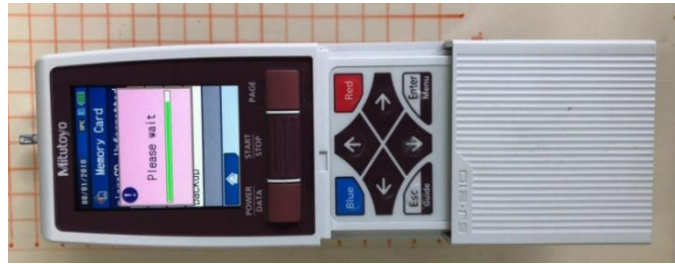
Fonte: Elaborada pela autora.

As bases foram posicionadas sobre o desempenho e o relógio foi calibrado em zero no ponto (0,0) de cada uma das placas, portanto este seria o ponto referencial, significando que qualquer outro ponto que apresentasse valor diferente desse estaria em relevo ou depressão em relação a ele. Para a leitura da planicidade, a agulha do equipamento provoca um movimento do ponteiro do relógio por sistema de mola. Caso o relógio girasse no sentido horário, significaria que o determinado ponto estaria em relevo, enquanto que para o sentido anti-horário, apresenta em depressão. Após retirados os dados, foram gerados os gráficos 3D no software MATLAB[®].

4.2.2. RUGOSIDADE DAS SUPERFÍCIES

A rugosidade das superfícies foi analisada de duas formas distintas: usando microscopia confocal, realizada no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE), da UFSCar, e usando um medidor de rugosidade superficial da marca Mitutoyo[®] (Figura 21) Modelo SJ-210, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar, para as placas utilizadas na metodologia do coeficiente de atrito de rolamento. O equipamento foi colocado em cima das placas e um pick-up (doravante chamado de ponta “stylus”) fino, o necessário para entrar nas rugosidades da placa, penetrava nas variações de relevo e fazia a leitura da rugosidade média para a superfície (Ra_w).

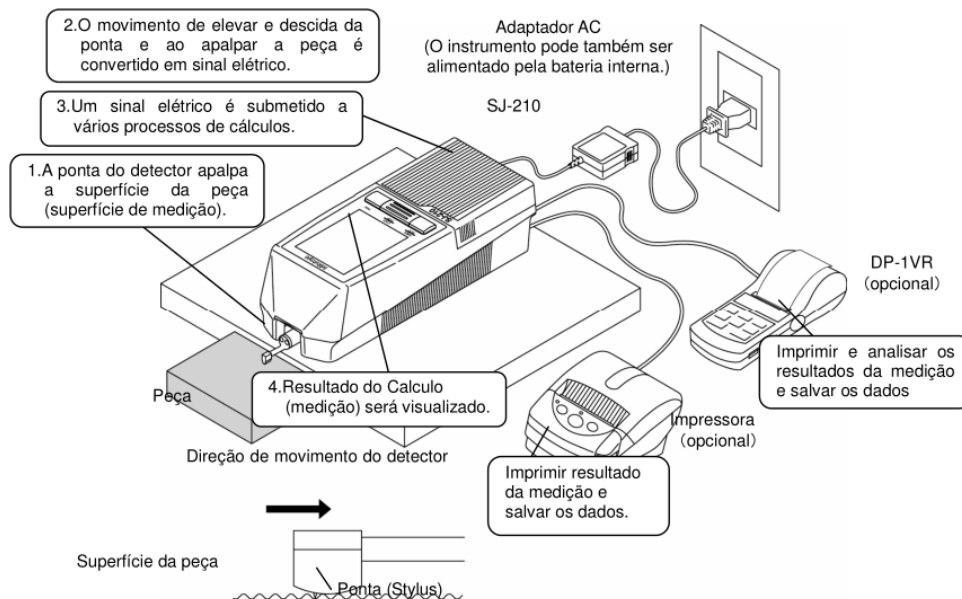
Figura 21 – Rugosímetro.



Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 22 mostra como é o funcionamento do equipamento de rugosímetro. É observado o pick-up encostando na superfície de medição e fazendo o movimento de subida ou descida. Após, o equipamento converte esse movimento em sinal elétrico que servem para alguns processos de cálculo. Surge na tela, então, o resultado da medição instantes depois.

Figura 22 – Medição com o SJ-210 e conexão a equipamentos relacionados.



Fonte: Manual SURFTEST SJ-210.

A leitura foi feita em uma área de comprimento 2,5 mm (padronizado pelo próprio equipamento) pela largura da ponta da agulha. Foram realizadas leituras numa distância útil de 0,5 mm numa velocidade de avanço de 0,5 mm/s e uma força de 4mN. Essa leitura foi feita apenas nas placas utilizadas nas análises de atrito de rolamento realizada pelo método da norma

ASTM G194-08, 2018 após a escolha da região com menor distorção de planicidade. O equipamento despreza a primeira e a última leituras.

Também é possível verificar o perfil de rugosidade gerado pelo próprio equipamento através de software SurfTest SJ disponibilizado em site da própria marca, o que serve como parâmetro para análise total de como a rugosidade interfere no processo de rolagem da esfera.

4.3. COEFICIENTE DE ATRITO DE ROLAMENTO

4.3.1. MÉTODO DA NORMA ASTM G194-08, 2018

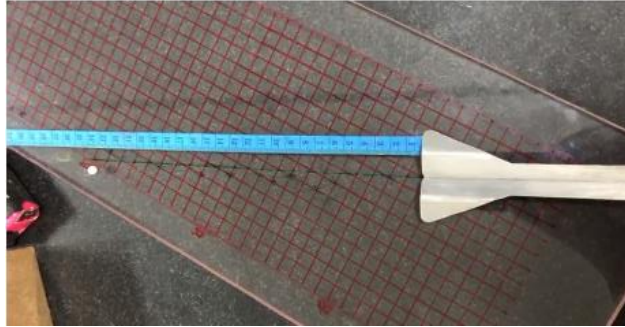
Neste método, é necessário que a esfera role em movimento retilíneo. Como no início dos estudos a partícula de ABS saía da trajetória, foi necessário a realização do estudo de planicidade das placas. Estas partículas, teoricamente, teriam a menor influência da rugosidade de sua superfície, visto que essa era a partícula mais lisa utilizada, portanto foi fácil considerar que houve influência da planicidade nos primeiros estudos. Logo após, foi escolhida uma região linear, tanto na placa de acrílico quanto na placa de vidro utilizadas para este método, onde as planícies eram o mais uniforme possível.

Para isso, verificou-se os pontos obtidos com os dados retirados pelo relógio apalpador e os gráficos em 3D gerados no MATLAB[®]. Selecionou-se pontos de mesmo valor de planicidade, marcando-os na superfície contrária à utilizada na movimentação das partículas, já que trata-se de placas transparentes e ficou fácil a visualização dos pontos. Depois, riscou-se uma linha reta ligando esses pontos, garantindo que eles estivessem em mesmo relevo e que a interferência do parâmetro de planicidade pudesse ser diminuída na medição do coeficiente de atrito de rolamento.

Colocou-se uma fita métrica ao lado da região marcada, sendo posicionada o final da rampa de alumínio na marcação zerada da fita, como visto na Figura 23. Seguiu-se, então, com a metodologia descrita pela norma ASTM G194-08 (2018) para cada uma das esferas.

Neste teste, as partículas foram posicionadas individualmente no alto da rampa de alumínio e deixadas que rolassem rampa abaixo até adentrarem e pararem nas superfícies de acrílico e vidro, previamente limpas com álcool 70%. A distância do rolamento foi então medida. Esse coeficiente foi determinado pela Equação 11.

Figura 23 – Equipamento para análise de coeficiente de atrito de rolamento pela norma ASTM G194-08 (2018).



Fonte: Elaborada pela autora.

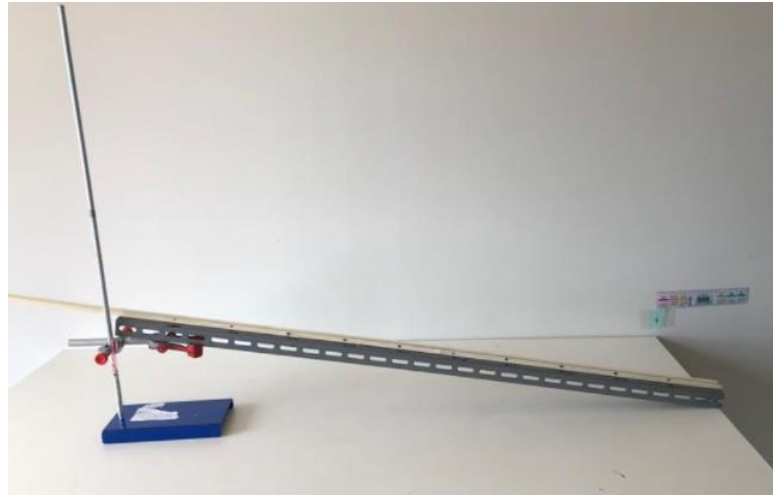
4.3.2. MÉTODO RAMPA INCLINADA

Neste método foi utilizado um suporte universal com garra, a qual serviu para prender uma base de alumínio contendo uma canaleta de construção, com superfície interna sem divisórias, suportada com fita adesiva dupla-face. Dentro da canaleta foi posicionada, também utilizando a fita adesiva, uma ripa de 1 metro e 10 centímetros do material utilizado para estudo (acrílico e vidro), previamente limpa álcool 70% e seca. O sistema pode ser conferido na Figura 24.

A base de alumínio em baixo serviu para fixar a canaleta em posição reta, já que se tratava de um material bastante flexível. Na mesma canaleta, foram feitas marcações de 10 em 10 centímetros, como visto na Figura 24 (marcações pretas da canaleta), para o posicionamento do início do movimento das esferas. O sistema foi então colocado sobre uma mesa nivelada com o chão. O final da rampa ficou posicionado na lateral da mesa.

Para esse método, houve três maneiras de encontrar a velocidade com que a partícula saía da rampa. A primeira foi pela conservação de energia das esferas, a qual foi medida pela Equação 27, o que indicaria que não há atrito das partículas com a superfície.

Figura 24 – Equipamento para análise de coeficiente de atrito de rolamento método rampa inclinada.



Fonte: Elaborada pela autora.

A segunda foi pelo alcance horizontal, sendo esse feito a partir da medida reta horizontal. Para isso, bem debaixo do término da rampa, foi colocada uma marcação feita com caneta esferográfica indicando a posição em que a partícula não estaria mais em contato com a superfície da rampa inclinada. A partir dessa marcação, foi fixada no chão uma tira de papel cartão branco de aproximadamente 1 metro por 15 centímetros, e em cima dessa tira era posicionada uma folha de papel carbono. A partícula caía em cima do papel carbono, fazendo uma pequena marcação no papel cartão. O papel carbono era retirado, então, para verificar a posição onde a esfera caía. Posteriormente, era feita a leitura da distância utilizando trena métrica.

Na terceira maneira, foi utilizada uma câmera de alta velocidade modelo Sony RX100IV a uma taxa de 960 quadros/s, a qual foi posicionada perpendicularmente à rampa bem na saída da esfera. O vídeo gravado foi convertido por função FFMPEG no prompt de comando de um computador, gerando todas as imagens gravadas. Foram selecionadas a última imagem em que a partícula teve contato com a superfície e as próximas serviram para analisar, no software ImageJ, as posições x e y nas quais elas se encontravam. Essas posições serviram para encontrar a velocidade final com a esfera saía da rampa através da equação de velocidade linear em duas direções:

$$\vec{v} = \sqrt{|\vec{v}_x|^2 + |\vec{v}_y|^2}, \quad (36)$$

em que v é a velocidade final com que a partícula sai da rampa, v_x é a velocidade final com relação a direção x e v_y é em relação a y. Como referência no software, foi utilizado o diâmetro da partícula analisada.

As velocidades foram obtidas mudando a altura e o comprimento com que a partícula era posicionada inicialmente. Para isso, foram utilizados trena métrica e transferidor pra medir a altura e o ângulo da rampa, respectivamente, em diferentes comprimentos. As escolhas de ângulos foram aleatórias, bem como os comprimentos de 20, 40, 60, 80 e 100 cm. Os ângulos escolhidos se mantiveram fixos, mas foram utilizados até que se percebia que a partícula começava a deslizar já no início do movimento ao invés de rolar, sendo eles: 5, 10, 14, 17, 23, 29, 31, 35, 39, 43, 48, 52 e 55°.

Ainda com os dados obtidos por este método, foi possível determinar o coeficiente de atrito de deslizamento das partículas e comparar os resultados obtidos com os resultados do método do plano inclinado, conforme metodologia proposta por Goya et. al. (2014).

Todos os ângulos e comprimentos foram analisados apenas para a partícula de ABS sem revestimento. As demais partículas foram analisadas, no acrílico, mantendo-se o comprimento de 20 cm e variando os ângulos, isso porque percebeu-se que quanto maior o comprimento, mais fácil seria para a esfera esbarrar nas laterais da rampa e os testes deveriam ser repetidos.

4.4. COEFICIENTE DE ATRITO DE DESLIZAMENTO

Uma das maneiras de determinar esse tipo de coeficiente foi a partir do método do plano inclinado. Para esse experimento, é necessário agrupar as partículas em aglomerados a partir de 3 esferas para cada tipo de partículas trabalhada nesse projeto, pois as medições desse coeficiente para apenas 1 ou 2 partículas são inviáveis, já que elas rolariam superfície abaixo ao invés de deslizar.

O procedimento consiste em dispor o aglomerado sobre a superfície de acrílico e de vidro e elevar o plano sob sistema de pistão hidráulico (Figura 25). Ao pressionar a seringa externa ao equipamento, a glicerina é, então, transferida para outra seringa, a qual eleva o plano. A escolha da glicerina foi feita para deixar o sistema mais preciso, já que se trata de um fluido

mais viscoso. O uso de ar não é indicado neste tipo de sistema, uma vez que o ar é compressível, provocando retardo na resposta do sistema.

Figura 25 – Equipamento para medição de coeficiente de atrito estático.

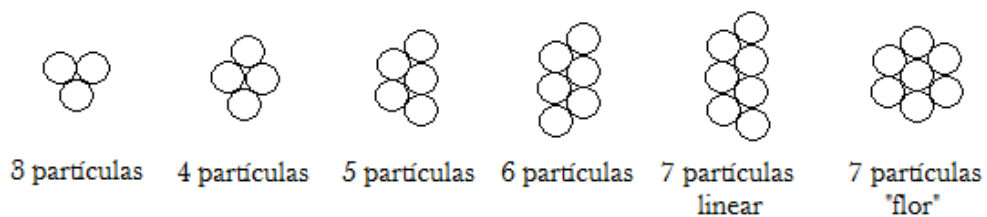


Fonte: Elaborada pela autora.

A leitura do ângulo é feita a partir de um visor digital acoplado a um sensor de ângulo, sendo esta realizada no momento que o aglomerado começa a se deslocar.

A fim de avaliar se a quantidade de partículas presentes nos aglomerados tem influência sobre o resultado, foram montados 6 tipos de aglomerados para cada tipo de partícula. Foi realizada a montagem para 3, 4, 5 e 6 partículas e duas para 7 partículas, representados na Figura 26.

Figura 26 – Esquema de montagem dos aglomerados.



Fonte: Elaborada pela autora.

A formação dos aglomerados foi feita a partir da colagem das partículas uma ao lado da outra com cola Superbonder® em gel (para não haver o escorrimento de líquido para a região

onde as partículas teriam contato com a superfície). Na montagem, tomou-se o cuidado para que todas as esferas tivessem suas superfícies ainda em contato com a superfície acrílica e vítrea. Para isso, o aglomerado foi montado em cima de uma folha de acetato transparente com fita adesiva dupla face onde se pudesse pressionar as partículas.

Ainda, os aglomerados de 7 partículas foram, inicialmente, montados em formato de “flor”, porém, com os resultados, viu-se a necessidade de seguir o padrão dos aglomerados menores formados a fim de verificar se haveria interferência ou não no ângulo de deslizamento. Por isso foram realizadas as duas hipóteses.

Foi feita a verificação da calibração do sensor de nível utilizando transferidor escolar e também a calibração do nível da superfície, com medidor de nível líquido de construção civil da marca Vonder®.

O ajuste do nível do equipamento foi feito com ajuda de pés giratórios feitos a partir de parafusos instalados na parte baixo da caixa. Feito isso, o nível da superfície foi verificado colocando uma partícula de ABS sem revestimento, que é bastante lisa e esférica, e observando se a mesma ficava estática ou se movia. Verificou-se, também, se o sensor de ângulo do sistema estava preso paralelamente à superfície de inclinação.

As placas foram lavadas e limpas com álcool 70%. Os aglomerados de todos os tipos de partícula foram posicionados sempre na mesma posição e mesma posição nas superfícies, como mostrado na Figura 27, a fim de se verificar o coeficiente do tipo partícula-superfície. Para isso, foi desenhada, na parte inferior das placas, uma seta que indicasse onde a esfera marcada do aglomerado deveria ser posicionada. Além disso, os aglomerados eram posicionados utilizando pinça metálica para que não houvesse transferência de gordura das mãos às partículas, fazendo assim, menor resistência de atrito dentre os corpos.

Posteriormente, a análise foi repetida, porém para se avaliar o coeficiente do tipo partícula-partícula. Para isso, foi construída uma superfície com partículas soltas, do mesmo material que o aglomerado avaliado. O aglomerado é colocado em cima da superfície (Figura 28) e o processo é repetido.

Figura 27 – Posicionamento de aglomerados na superfície de acrílico.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 28 – Posicionamento dos aglomerados para análise do coeficiente de deslizamento partícula-partícula.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.5. FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA

As Figuras 29 e 30 apresentam o fluxograma da metodologia descrita para todos os processos de análises que este projeto contém.

Figura 29 – Fluxograma de resumo da metodologia das superfícies

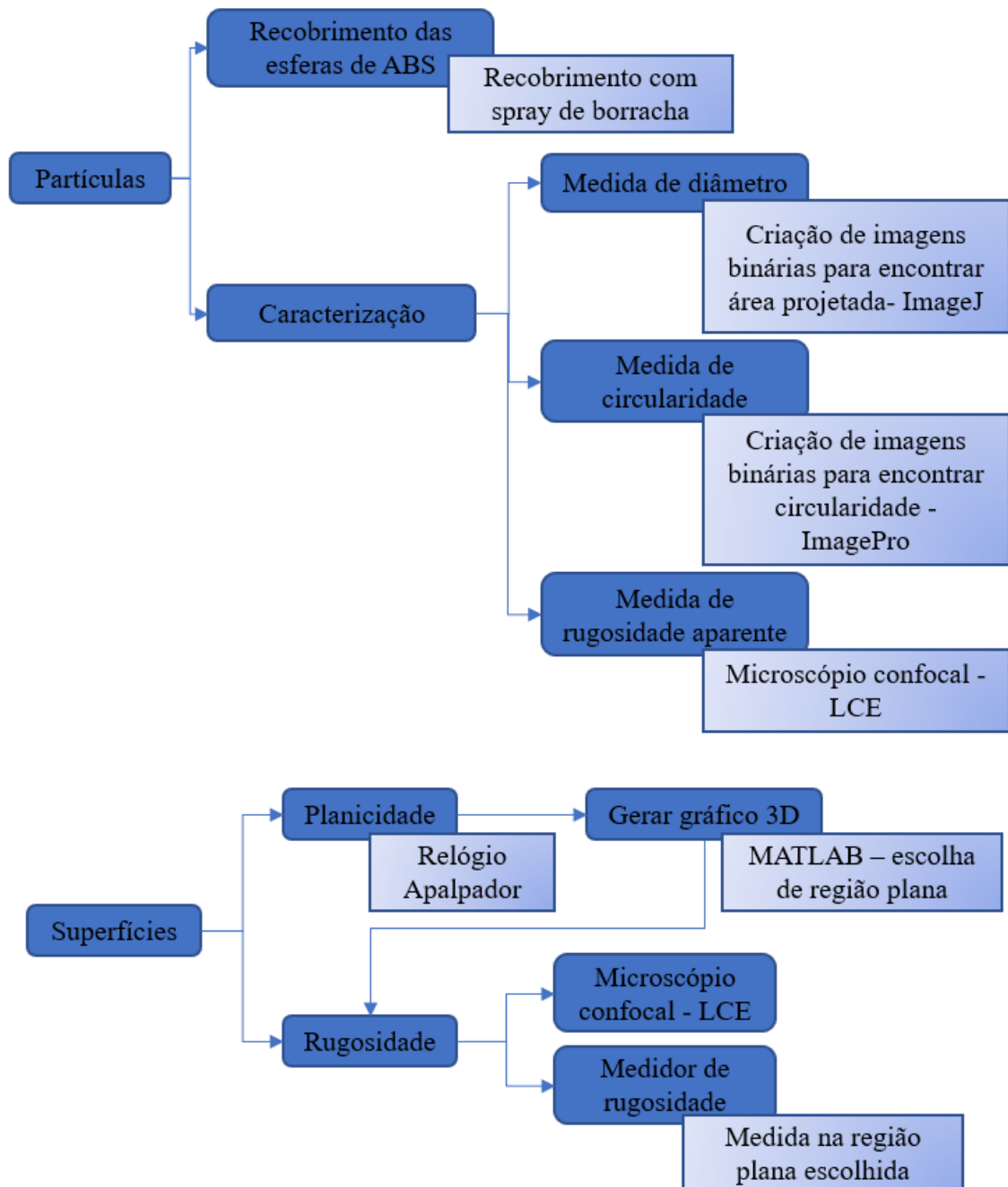
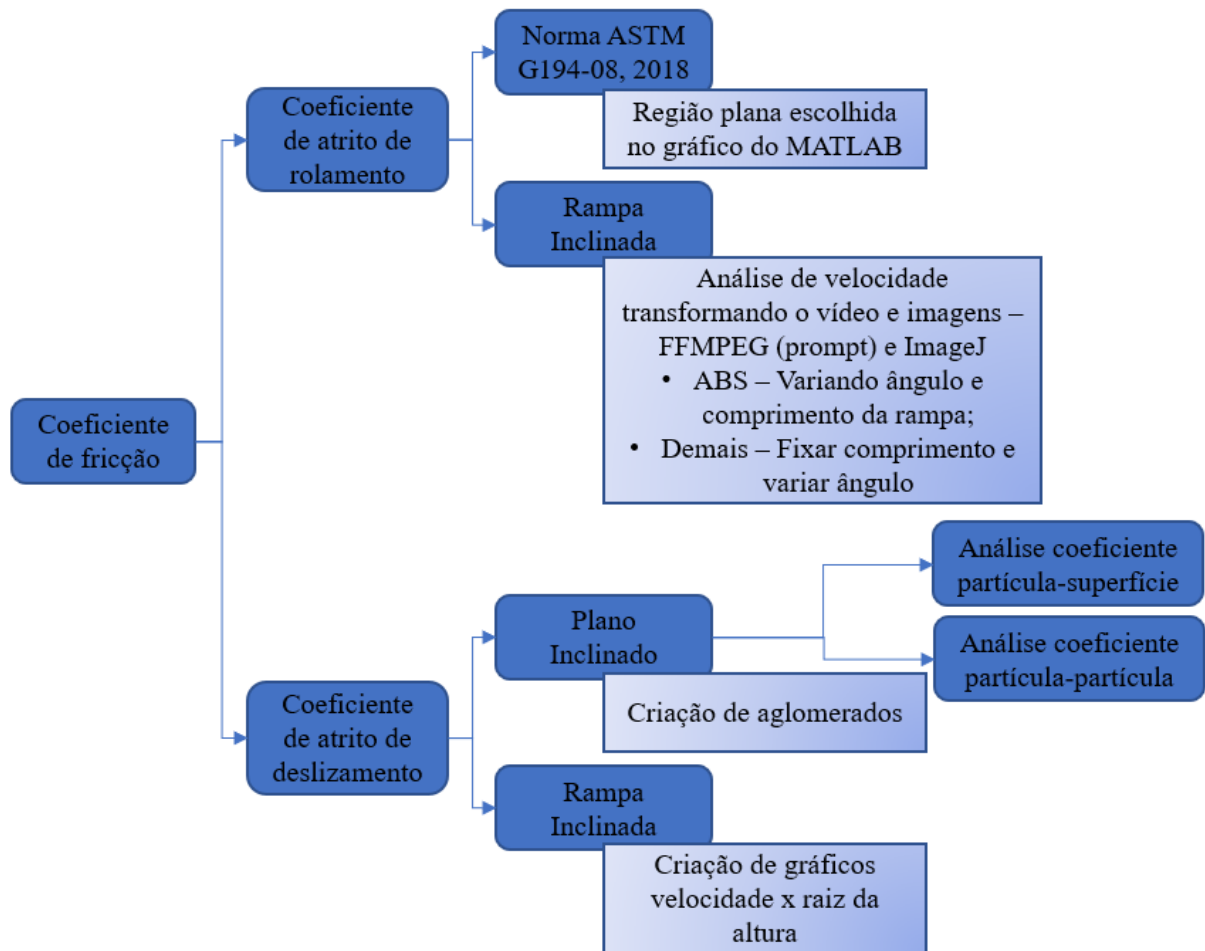


Figura 30 – Fluxograma de resumo da metodologia dos coeficientes



Fonte: Elaborada pela autora.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS

As partículas foram analisadas quanto ao seu diâmetro, circularidade e rugosidade média. As medidas de diâmetro e circularidade estão apresentadas na Tabela 3, sendo σ o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 3 – Medidas de diâmetro e circularidade das partículas com propriedades diferentes.

Partícula	Diâmetro [mm] $\pm \sigma$	Circularidade [] $\pm \sigma$
ABS sem revestimento	5,827 \pm 0,023	0,980 \pm 0,002
ABS com 1 camada de revestimento	5,994 \pm 0,070	0,943 \pm 0,003
ABS com 2 camadas de revestimento	6,020 \pm 0,047	0,938 \pm 0,009
Fluorelastômero	4,732 \pm 0,040	0,979 \pm 0,005
Nitrila	4,685 \pm 0,052	0,981 \pm 0,004
Alumina	6,259 \pm 0,082	0,856 \pm 0,012
Porcelana	5,800 \pm 0,150	0,839 \pm 0,015

Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados analisados no software ImageJ mostraram maiores valores de diâmetro para o grupo das partículas de ABS, alumina e porcelana. No entanto, apenas as partículas de ABS sem revestimento apresentaram um intervalo de confiança menor, indicando que elas são mais regulares em termos de tamanho. As partículas de alumina e porcelana apresentaram intervalos maiores, o que confirma a variação de diâmetro significativa observada visualmente.

Com relação à circularidade das partículas, medidas no software ImagePro Plus, pode-se observar que as esferas de ABS sem revestimento são as que se aproximam do valor 1, indicando que essas são as mais circulares.

Quando se trata das partículas de ABS com revestimento, pode-se ver que a circularidade diminui bastante. Isso ocorreu por conta das dificuldades encontradas no método empregado para fazer o recobrimento, o que resultou em uma camada irregular na superfície. Esta irregularidade também é observada nas biopartículas, que não são totalmente esféricas.

As partículas de borracha também apresentaram valores próximos de uma esfera circular ideal, porém as partículas de alumina e porcelana apresentaram circularidade mais baixas em relação às outras esferas, indicando que elas estão mais longe de serem esferas circulares perfeitas.

Além das propriedades físicas apresentadas, as esferas foram caracterizadas quanto à sua rugosidade média, a qual foi analisada por microscopia confocal. Na Tabela 4 são apresentados os resultados para rugosidade média das partículas rígidas, obtidas com diferentes aproximações focais do microscópio.

Tabela 4 - Dados de rugosidade média para partículas poliméricas com diferentes aproximações.

Aproximação Partículas	Ra _p (µm)		
	5x	10x	20x
ABS sem revestimento	99,368	24,548	6,006
ABS com 1 camada de revestimento	102,334	24,902	6,975
ABS com 2 camadas de revestimento	101,143	25,758	10,563
Fluorelastômero	136,012	30,556	7,812
Nitrila	136,067	31,002	7,656
Alumina	99,507	24,625	8,426
Porcelana	106,018	29,365	7,345

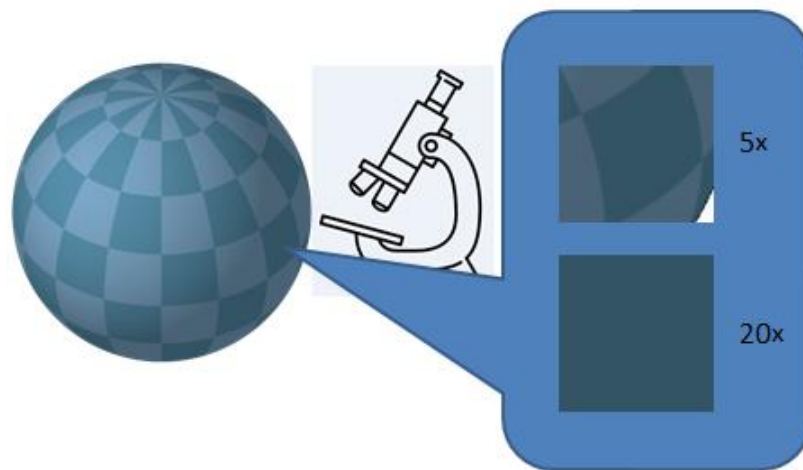
Fonte: Elaborada pela autora.

Por se tratar de partículas esféricas, a área analisada na microscopia confocal é mascarada conforme a diminuição de foco. Isso aconteceu porque a região analisada não se encontra totalmente plana com focos menores e, por isso, a rugosidade média é aparente. Para explicar melhor, a Figura 31 mostra que a área analisada em foco 5x não é totalmente plana. Porém,

conforme ocorre a ampliação para o foco de 20x, a área analisada diminui, se aproximando de uma região plana e mostrando um valor de rugosidade mais realista. Com isso, é possível considerar que, para focos menores, a rugosidade é desconfigurada.

Como a rugosidade é quantificada através de medidas relacionadas à altura ou largura das irregularidades, conforme a área analisada da esfera diminui, menor a quantidade de irregularidades, por isso o valor de *Ra* diminui.

Figura 31 – Área analisada das partículas conforme aumento de foco.



Fonte: Elaborada pela autora.

Observa-se que as aproximações das imagens exerceram influência nos resultados de rugosidade média, sendo observados maiores imperfeições para aumentos de 5x. Mas, os valores da Tabela 4 mostraram uma tendência à diminuição da rugosidade aparente para maiores ampliações por restringirem a área de análise.

Como se pode observar na Tabela 4, quando se compara as partículas entre si, não há uma constância de diminuição progressiva de valores de rugosidades conforme se diminui o foco. Logo, para se realizar as análises considerando o efeito desse parâmetro sobre os coeficientes de atrito, deve-se escolher um dos focos.

Como visto, no foco de 5x, a área analisada ainda se apresenta esférica, por isso, os valores de rugosidade foram mascarados. Sendo assim, pode-se acreditar que o foco de 20x deva ser o ideal para a análise. Contudo, vale levar em consideração que quanto mais próximo o foco, menor a área de análise e, conseqüentemente, menos rugosidade é lida pelo equipamento. Por isso, a média dos valores de rugosidades é afetada e diminuiu-se, assim, o desvio

padrão. Portanto, para esse projeto, foi escolhido o foco de 10x, pois considerou-se que a quantidade de dados coletados pelo equipamento, na área medida, pode ser considerada suficiente para se ter uma média de rugosidade próxima da realidade de cada partícula, além de se tratar de uma área próxima de ser plana.

É interessante pensar que uma análise de média ponderada em relação à área analisada em cada foco facilitaria o entendimento da atuação desse parâmetro sobre os coeficientes medidos nesse projeto. No entanto, como a área de análise para o foco de 5x é maior, ela aparentemente não é plana, logo os dados são distorcidos. Por isso, não é possível padronizar uma média ponderando a área analisada para obter apenas um valor da rugosidade utilizando os três focos.

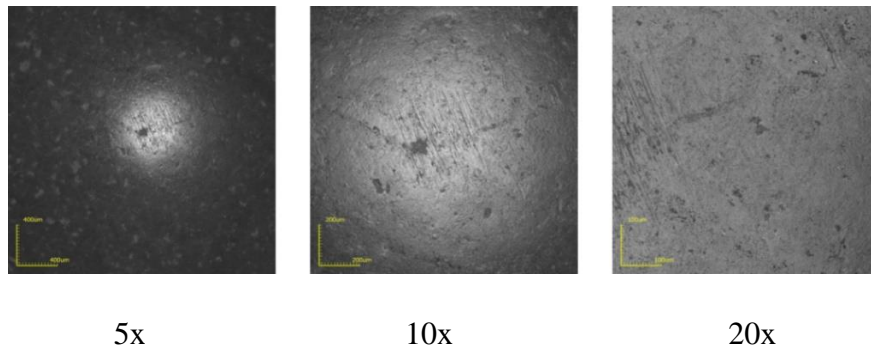
Sendo assim, quando se considera que apenas a rugosidade deve influenciar nos coeficientes de atrito, é de se esperar que a ordem dos valores do menor para o maior seja: ABS sem revestimento, alumina, ABS com 1 camada de revestimento, ABS com 2 camadas de revestimento, porcelana, fluorelastômero e nitrila.

Voltando à análise da rugosidade sobre o coeficiente de atrito, a dissipação de energia cinética será maior para o experimento do coeficiente de atrito de rolamento e a força de atrito é maior para o experimento de coeficiente de atrito de deslizamento. Ao afirmar isso, indica-se que somente a rugosidade está influenciando nesse efeito, no entanto outros parâmetros devem ser estudados.

Para auxiliar no estudo da influência da rugosidade sobre os coeficientes de atrito, os aspectos das superfícies das partículas são observados nas imagens de microscopia confocal apresentada nas Figuras 32 a 38.

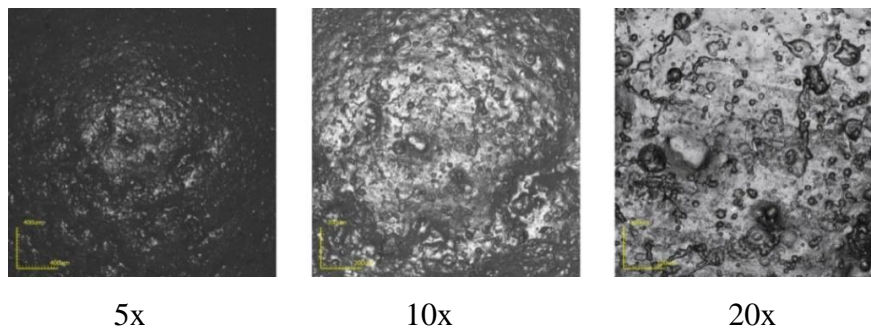
Na análise da Tabela 3, uma observação que pode ser feita entre as comparações das rugosidades médias das partículas de ABS com revestimento é a não possibilidade de dizer qual das duas é mais rugosa. O segundo recobrimento das partículas pode tanto aumentar a rugosidade, como pode ser analisado na comparação entre as duas partículas no foco de 10x, quanto recobrir as rugosidades que já existiam nas partículas com uma camada apenas, deixando as partículas com duas camadas mais lisas, observado no foco de 5x. Quando se analisam as Figuras 33 e 34 para os focos de 10x, é possível perceber que aparentemente a ABS de 2 camadas de revestimento é mais rugosa que a de 1 camada indicando que a escolha do foco 10x é realmente a mais indicada.

Figura 32 – Imagens de microscopia confocal das superfícies das partículas de ABS sem revestimento.



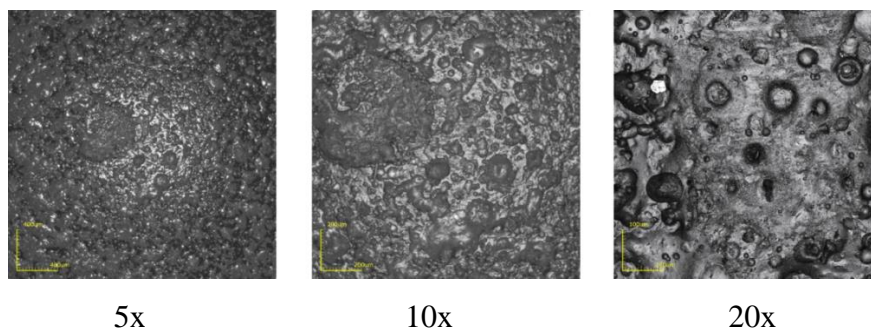
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 33 – Imagens de microscopia confocal das superfícies das partículas de ABS com 1 camada de revestimento.



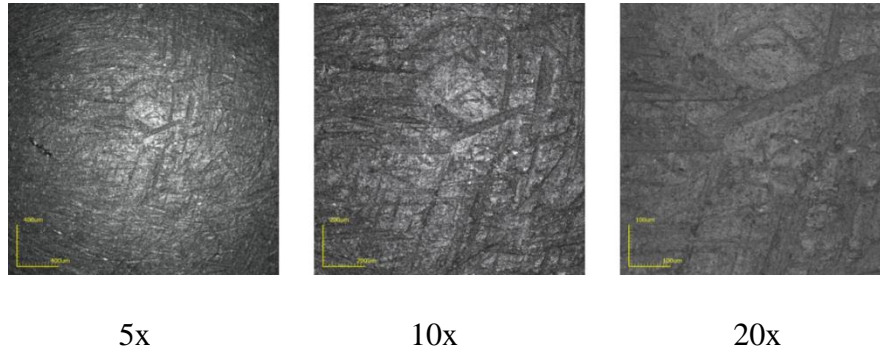
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 34 – Imagens de microscopia confocal das superfícies das partículas de ABS com 2 camadas de revestimento.



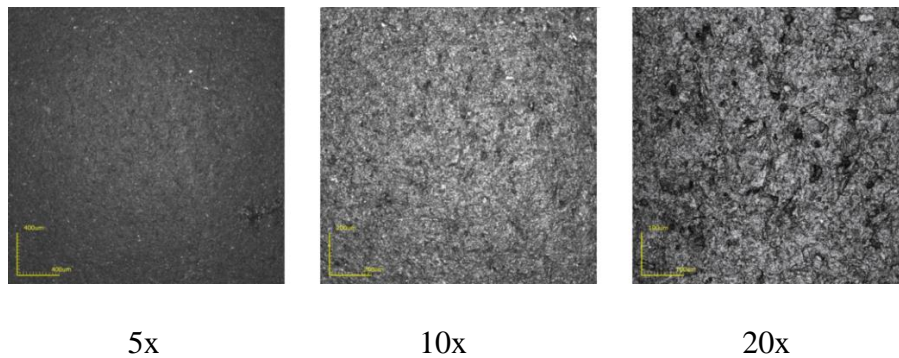
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 35 – Imagens de microscopia confocal das superfícies das partículas de fluorelas-tômero.



Fonte: Elaborada pela autora.

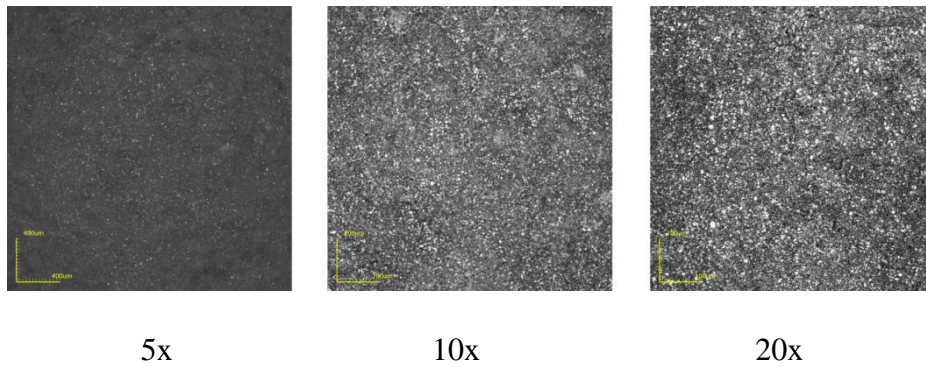
Figura 36 – Imagens de microscopia confocal das superfícies das partículas de nitrila.



Fonte: Elaborada pela autora.

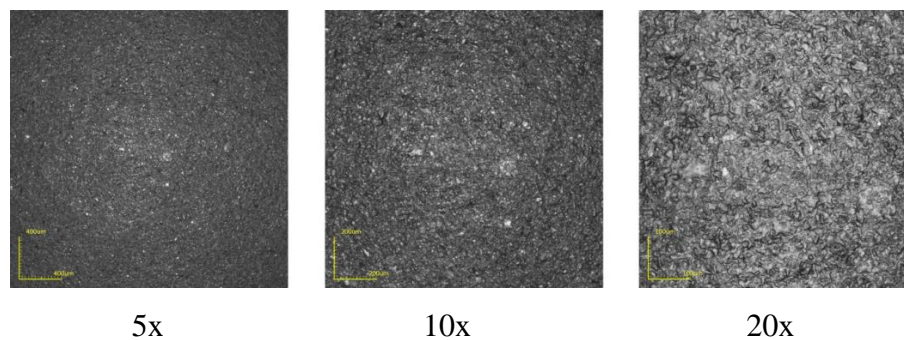
Observa-se que as partículas de ABS sem revestimento e alumina apresentaram maior homogeneidade nas superfícies, enquanto as que foram revestidas com spray de borracha apresentaram maior quantidade de imperfeições, com aparecimento de cavidades (poros) e regiões de aspereza. Esse efeito é confirmado nos valores de rugosidade média apresentados na Tabela 4.

Figura 37 – Imagens de microscopia confocal das superfícies das partículas de alumina.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 38 – Imagens de microscopia confocal das superfícies das partículas de porcelana.



Fonte: Elaborada pela autora.

As partículas de nitrila também apresentaram cavidades na superfície, fato este também observado pelos valores da rugosidade da Tabela 4. Porém, na Figura 35, observa-se que as partículas de fluorelastômero, ao invés de apresentarem cavidades, apresentam asperezas e aglomerados filamentosos ou “ranhuras”, que resultaram nos altos valores observados para a rugosidade média desse grupo de esferas.

Já para as partículas de alumina (Figura 37), apesar de apresentarem grande homogeneidade na superfície, o que deve explicar os valores de coeficientes de atrito se aproximar dos valores de rugosidade para as partículas de ABS sem revestimento. Com relação às partículas de porcelana, a rugosidade média obtida se aproximou das partículas de ABS com revestimento e ficaram bem abaixo dos valores das partículas de fluorelastômero e nitrila, indicando que os

coeficientes de atrito desse tipo de partícula devam ficar próximos aos coeficientes de ABS com revestimento e abaixo do fluorelastômero.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS

Todas as placas utilizadas passaram por análise de rugosidade em microscopia confocal. As placas usadas na determinação dos coeficientes de atrito de rolamento pelo método da norma ASTM G194-08 (2018) foram as únicas que também passaram por análise utilizando o rugosímetro. Os dados obtidos para os materiais acrílico e vidro, estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Rugosidade das superfícies das placas.

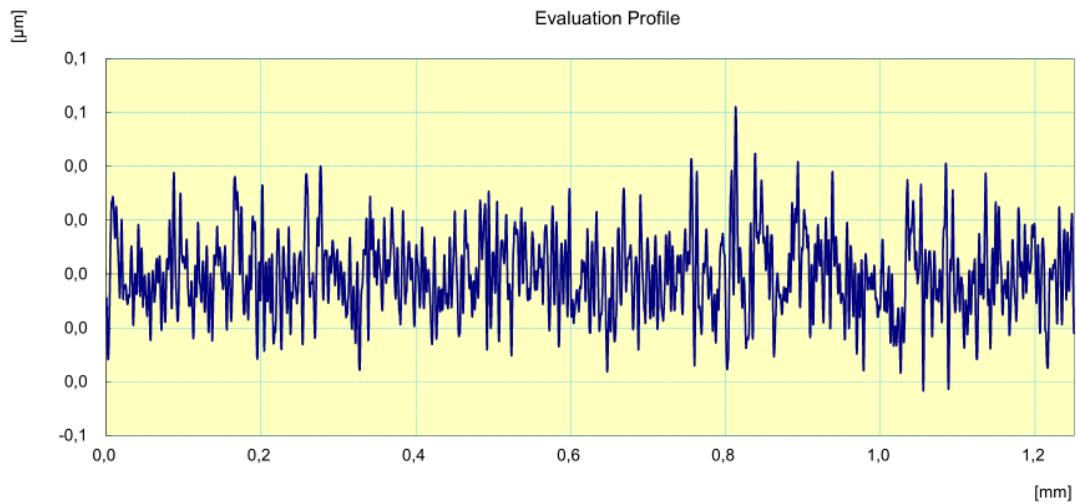
Método utilizado/foco	Rugosidade (μm) / Placa	
	Acrílico	Vidro
Microscopia confocal 5x	0,652	0,409
Microscopia confocal 10x	0,125	0,063
Microscopia confocal 20x	0,048	0,026
Rugosímetro	0,013 \pm 0,002	0,098 \pm 0,032

Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados obtidos por rugosímetro foram feitos em triplicata, por isso possuem margem de erro, enquanto as análises por microscopia confocal foram feitas em única amostragem para as três aproximações de foco.

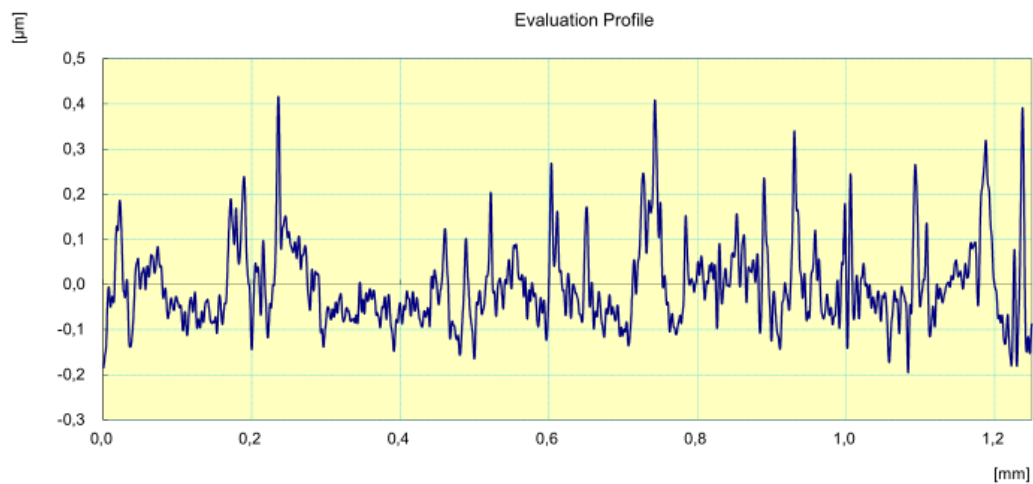
Pode-se observar na Tabela 5 que os valores de rugosidade analisados por rugosímetro foram menores que as análises por microscopia confocal. Utilizando o software SJ-Communication-Tool disponível no site da Mitutoyo[®], foi gerado o perfil de rugosidade das placas, sendo a Figura 39 para o acrílico e a Figura 40 para o vidro. Os gráficos mostram o comprimento que a agulha percorreu (eixo x) pela rugosidade (eixo y) local medida em μm .

Figura 39 – Perfil de rugosidade da placa de acrílico utilizadas no método norma ASTM G194-08.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 40 – Perfil de rugosidade da placa de vidro utilizada no método norma ASTM G194-08.



Fonte: Elabora pela autora.

Os gráficos mostram que a placa de vidro aparentemente tem maior densidade de irregularidades que a de acrílico, fazendo jus aos valores encontrados pelo rugosímetro (Tabela 5). É visto na placa de vidro mais regiões de picos afastadas comparado à placa de acrílico, justificando exatamente a maior rugosidade.

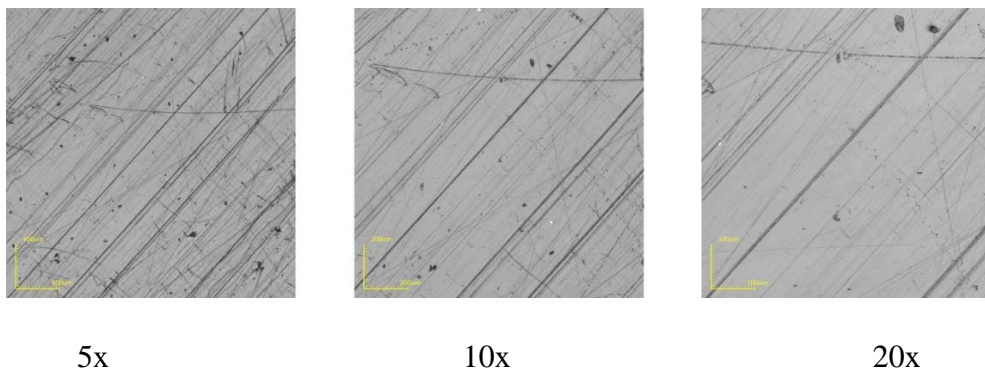
A diferença de valor de rugosidade tão baixo no método analisado pelo rugosímetro comparado com os resultados da microscopia confocal se deve à maneira como o método verifica os resultados. O equipamento acaba por separar os perfis pelos comprimentos de ondas e considera que os valores de rugosidade são aqueles representados somente pelo perfil de rugosidade, desconsiderando o perfil de ondulação, conforme Figura 5.

Uma observação que pode ser feita é que o método de análise de rugosidade também pode ser verificado para superfícies circulares. Neste caso, é recomendada a inclusão do raio para otimização do método dos mínimos quadrados e não manter fixo o valor nominal. Este procedimento para separação do perfil de ondulação define o operador da ondulação ideal. No entanto, para os experimentos das partículas é necessário os suportes e bases que não estavam disponíveis, já que são itens comprados a parte do equipamento, por isso, não foi possível apresentar os resultados e fazer comparação entre os métodos para as partículas.

Considerando que os dois perfis acabam interferindo no atrito, para continuar as análises dos coeficientes de atrito, somente os valores de rugosidade retirados pelo método de microscopia confocal serão considerados.

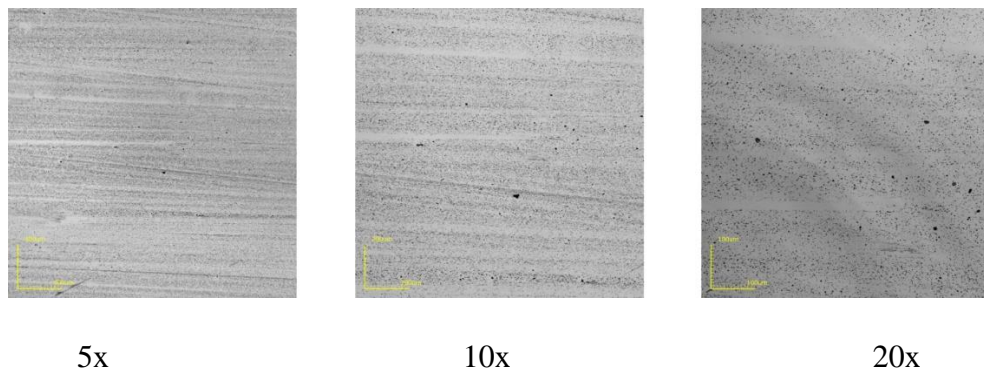
Prosseguindo com as microscopias confocais, as placas de acrílico revelaram riscos (Figura 41), enquanto que as placas de vidro apresentaram microcavidades (Figura 42). No entanto, não é possível observar com exatidão as rugosidades delas, isso porque trata-se de material transparente, o que pode dificultar a identificação apenas das imperfeições superficiais ao invés das que podem conter dentro do material.

Figura 41– Imagens de microscopia confocal da superfície de acrílico.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 42 – Imagens de microscopia confocal da superfície de vidro.



Fonte: Elaborada pela autora.

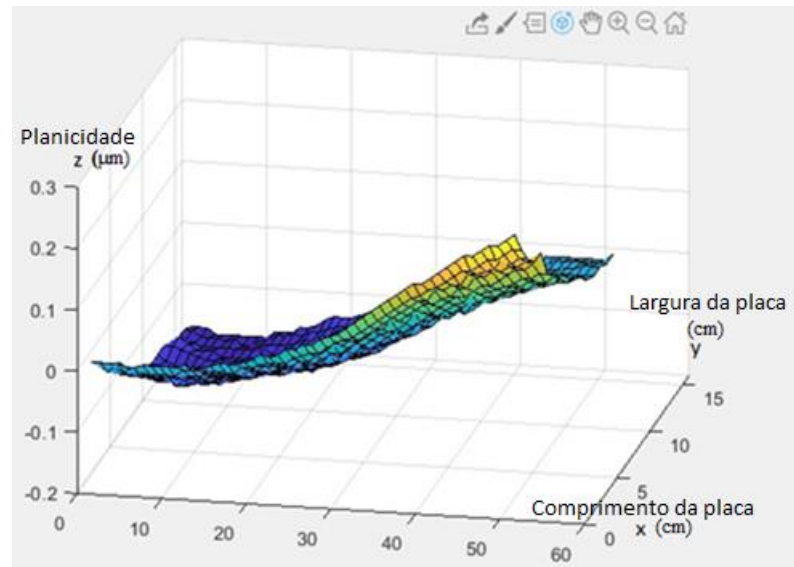
5.3. RESULTADOS DAS PLANICIDADES DAS PLACAS PARA NORMA ASTM G194-08

Os testes para planicidade indicaram regiões de relevo e depressão nas placas utilizadas no método da norma ASTM G194-08 para análise do coeficiente de atrito de rolamento. Os dados retirados pelo relógio apalpador foram imputados no software Matlab para geração dos gráficos 3D. O comprimento das placas está indicado pelo eixo x, enquanto que a largura se apresenta no eixo y e a planície no eixo z. As Figuras 43 e 44 mostram a área analisada da placa de acrílico e vidro, respectivamente.

A Figura 43 mostra uma área com muita depressão representada pela coloração azul escuro. Nota-se também uma região linear, onde todos os dados obtidos foram próximos de zero com relação ao ponto referência (0,0,0). Essa região foi escolhida (Figura 44), já que considerou que ela demonstra a menor interferência do plano sobre o rolamento das partículas.

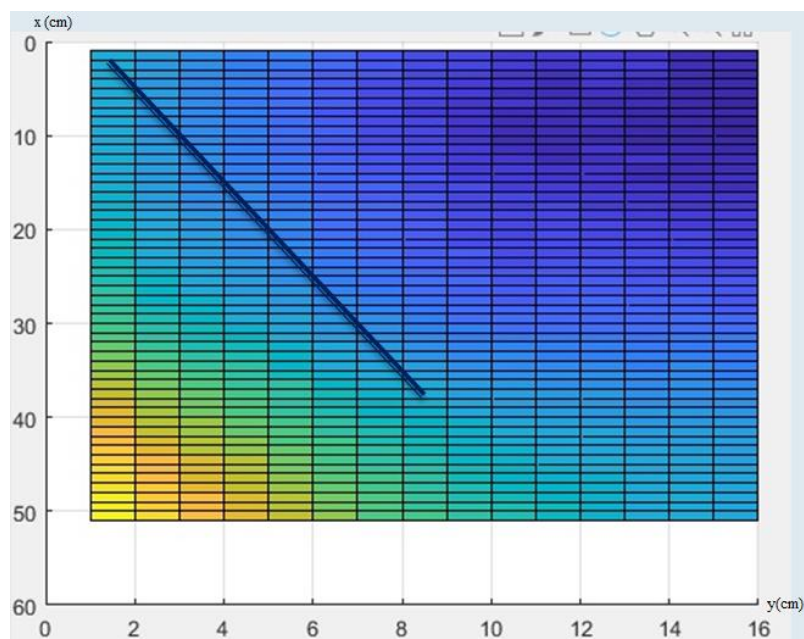
Já na Figura 45, é apresentada a planicidade da placa de vidro. Observa-se que não houve uma região linear que estivesse plana com nível zero em relação ao ponto (0,0,0) como a de acrílico, porém é possível ver uma região toda em relevo de mesmo nível, sendo essa uma região amarela clara, onde o valor de planicidade foi de 0,04 μm (Figura 46).

Figura 43 – Planicidade da placa deacrílico.



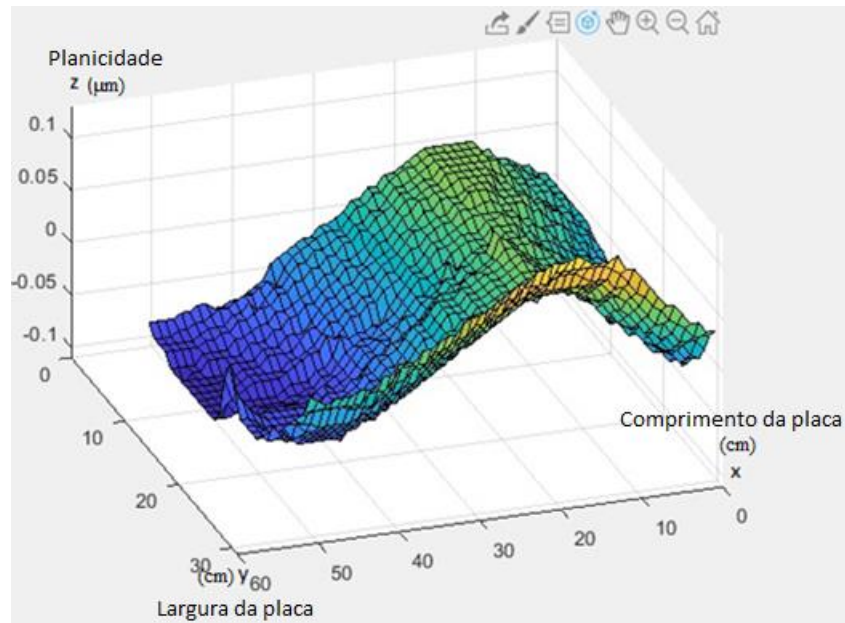
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 44 – Vista superior da placa deacrílico para teste de coeficiente de atrito de rolamento pela norma ASTM G194-08.



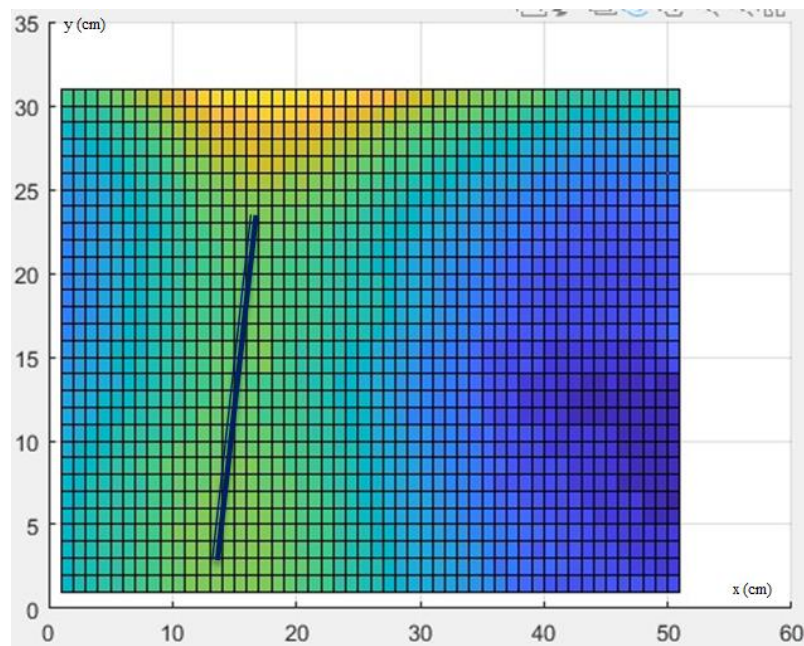
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 45 – Planicidade da placa de vidro.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 46 – Vista superior da placa de vidro para teste de coeficiente de atrito de rolamento pela norma ASTM G194-08.



Fonte: Elaborada pela autora.

5.4. COEFICIENTE DE ATRITO DE ROLAMENTO

A região linear mapeada pela planicidade com a menor interferência possível de relevo ou declínio foi a considerada para a análise do coeficiente. Os resultados obtidos para as distâncias lineares percorridas das partículas sobre as placas de acrílico e vidro e os coeficientes de atrito de rolamento são dispostos na Tabela 6, sendo as margens de erros feitas pelos intervalos de confiança 95%.

Os coeficientes medidos por esse método foram calculados segundo a Equação 11. Vale enfatizar que, para os dois métodos, foram analisados apenas os coeficientes do tipo partícula-superfície ($\mu_{r_{pw}}$).

Tabela 6 – Distância ([cm] $\pm \sigma$) percorrida para atrito de rolamento e coeficiente de atrito de rolamento (μ_r [] $\pm \sigma$) segundo norma ASTM G194-08.

Superfície	Acrílico		Vidro	
Partícula	Distância percorrida (cm)	$\mu_{r_{pwA}}$	Distância percorrida (cm)	$\mu_{r_{pwV}}$
ABS sem revestimento	24,43 \pm 0,78	0,0207 \pm 0,0007	25,75 \pm 0,50	0,0195 \pm 0,0004
ABS com 1 camada de revestimento	1,78 \pm 0,06	0,2852 \pm 0,0110	3,00 \pm 0,11	0,1687 \pm 0,0060
ABS com 2 camadas de revestimento	1,57 \pm 0,07	0,3282 \pm 0,0189	2,06 \pm 0,09	0,2479 \pm 0,0108
Fluorelastômero	4,01 \pm 0,13	0,1259 \pm 0,0040	5,24 \pm 0,23	0,0936 \pm 0,0046
Nitrila	12,22 \pm 0,34	0,0413 \pm 0,0012	13,59 \pm 0,30	0,0370 \pm 0,0009
Alumina	13,75 \pm 0,31	0,0366 \pm 0,0008	16,86 \pm 0,71	0,0302 \pm 0,0014
Porcelana	21,07 \pm 0,94	0,0242 \pm 0,0011	22,30 \pm 0,34	0,0225 \pm 0,0004

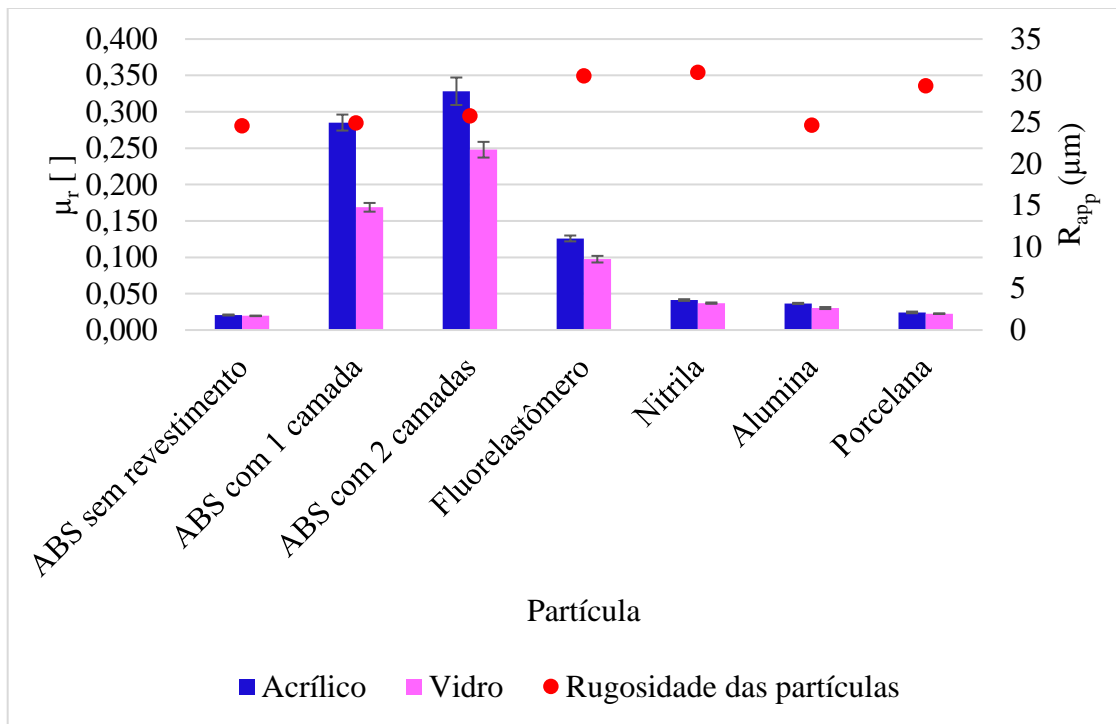
Fonte: Elaborada pela autora.

Como a altura do ponto de partida na rampa de alumínio para todas as partículas é fixa (sendo considerada neste projeto de 0,5 cm), a Equação 11 só é modificada com relação à distância percorrida pelas partículas, ou seja, quanto maior a distância, menor será o coeficiente,

devido o resultado ser afetado inversamente proporcional em relação a esse parâmetro. Isso significa dizer que quanto mais a partícula percorre uma distância reta, menos ela é influenciada pela rugosidade, tanto dela própria, quanto da placa, logo o coeficiente é menor.

Os resultados da Tabela 6 demonstram a influência das propriedades das partículas sobre o coeficiente de atrito de rolamento. Os mesmos resultados são mais bem observados na Figura 47, onde também são mostradas as rugosidades das partículas (Ra_p), considerando o foco de 10x como o ideal de análise.

Figura 47 – Coeficiente de atrito de rolamento analisados pelo método da norma ASTM G194-08 (2018).



Fonte: Elabora pela autora.

Com relação às superfícies utilizadas, pode-se observar que a de acrílico, que apresenta o maior valor de rugosidade aparente do que o vidro (Tabela 5) no foco de 10x, os valores de coeficientes de atrito de rolamento foram maiores no acrílico do que no vidro para todas as partículas. Esse comportamento é esperado, já que o coeficiente é bastante influenciado pelas rugosidades das superfícies envolvidas.

Não é possível dizer que quanto mais rugosa a partícula, maior é a diferença observada para o coeficiente usando diferentes placas, já que os resultados utilizados para rugosidade foram os medidos em microscopia confocal no foco de 10x, e com isso, a ordem crescente dos

valores de coeficiente nas partículas deve ser ABS sem revestimento, alumina, ABS com 1 camada de revestimento, ABS com duas camadas de revestimento, porcelana, fluorelastômero e nitrila, como já citado. Caso fosse escolhido outro foco, essa tendência não seria observada. Seguindo essa ordem, as partículas de borracha teriam uma diferença considerável no coeficiente de atrito de rolamento medido nas duas placas, porém não é o que se observa, pois as maiores diferenças são para as partículas de ABS com revestimento.

Pode-se observar que as partículas de ABS sem revestimento foram as que obtiveram o menor valor de coeficiente de atrito de rolamento nas duas superfícies, isso considerando esse valor trata-se apenas da interferência da rugosidade média sobre ele. Depois, os valores são aumentados para as partículas de alumina. Estas duas também apresentaram menores valores de rugosidade média, vistos na Tabela 4, logo confirma-se que se levado em conta apenas as rugosidades das superfícies, os coeficientes de atritos são menos afetados pelas superfícies menos rugosas.

Considerando que as partículas de ABS sem revestimento são as que possuem menor rugosidade, como pode ser visto na Figura 32. Assim, é de se esperar que, durante o rolamento dessas partículas pela placa, haja a menor dissipação de energia provocada pelo atrito por elas possuírem menor área de contato e menor atrito. Ou seja, a energia potencial que foi transformada em cinética é dissipada com menor intensidade do que quando se comparada com as outras partículas.

Ainda levando em conta apenas a interferência da rugosidade das superfícies sobre o coeficiente, as partículas mais rugosas, como fluorelastômero e nitrila, deveriam possuir maiores valores de μ_r , destacando que as partículas de nitrila apresentariam o maior coeficiente, já que possui a maior rugosidade média, porém não é isso o observado.

Outra exceção é para as partículas de porcelana, que deveria ter coeficiente próximo ao coeficiente de fluorelastômero, mas os valores obtidos se aproximam das partículas lisas. Sendo assim, pode-se confirmar que o coeficiente de atrito de rolamento não depende apenas da rugosidade das superfícies. Logo, possivelmente há outros parâmetros que influenciam no coeficiente de atrito de rolamento.

Segundo a norma ASTM G194-08, o coeficiente não é afetado apenas pelas texturas das superfícies dos materiais, mas também pela rigidez da forma esférica, raio de curvatura, filmes da superfície e natureza da superfície da partícula. Por isso, esferas como alumina e

porcelana são importantes para discussão do assunto, já que sua circularidade foge de uma esfera ideal, como visto na Tabela 3, o que pode ter influenciado no rolamento.

Em observações durante o experimento, viu-se que o raio da esfera aparentemente não interfere na distância que a partícula deve rolar, porém, o mesmo não ocorre com o raio de curvatura. O raio de curvatura é uma magnitude que mede a curvatura de um objeto geométrico tal como uma linha curva, uma superfície ou mais genericamente uma variedade diferenciável imersa em um espaço euclidiano. Ele é matematicamente descrito como

$$R' = \frac{1}{|k'|}, \quad (37)$$

em que R' é o raio de curvatura e k' a curvatura medida através de uma função. Sendo assim, as partículas que possuem circularidade próximo de 1, como ABS sem revestimento, nitrila e fluorelastômero (Tabela 3), tem menor influência do raio de curvatura sobre o coeficiente; já para as partículas de alumina e porcelana, os coeficientes com certeza foram influenciados por esse parâmetro.

Além disso, a força de adesão também influencia no coeficiente de atrito de rolamento. A força adesiva pode ser definida como sendo a força exigida para desprender uma partícula aderida a uma superfície. A adesão pode ser compreendida como a atração entre duas superfícies em contato comum e produzida pela existência de forças atrativas intermoleculares de ação de curtíssima distância entre os corpos (Felicetti, 2004).

Quando se compara as imagens das microscopias confocais da borracha nitrílica (Figura 36) com as de ABS com revestimento (Figuras 33 e 34), é possível observar que a primeira possui mais homogeneidade, o que resulta em menor contato entre as microirregularidades das superfícies, conseqüentemente, menor a adesão entre as superfícies, logo menor dissipação de energia. Já em relação às partículas de fluorelastômero, os aglomerados de filamento possuem interação diferenciada que devem ser melhor estudada.

As partículas de nitrila têm menor diâmetro comparadas com as ABS com revestimento, portanto sua área de contato é muito menor do que a área de contato aparente, o que pode justificar a obtenção de valor menor no coeficiente. Isso só é válido porque as partículas trabalhadas não são totalmente esféricas, nem mesmo totalmente rígidas; caso fossem, o contato ocorreria em um único ponto, facilitando a análise do coeficiente.

As partículas de ABS com revestimento, além de apresentarem altos valores do coeficiente de atrito de rolamento, também possuem intervalo de confiança maior em relação aos

demais, evidenciando que esse método pode não ser totalmente confiável para encontrar o coeficiente para esses tipos de partículas. Porém, por se tratarem de partículas com recobrimento não uniforme, é de se esperar que os desvios sejam altos.

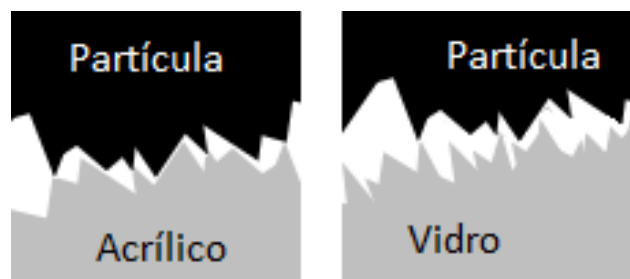
Vale dizer ainda que foi considerado que a rampa de alumínio estava totalmente dentro das normas estabelecidas. Por isso, considera-se que a dissipação de energia no rolamento das partículas rolando pela rampa é mínima, não havendo amortecimento ou salto da partícula ao sair da rampa, o que pode ser totalmente eliminado no experimento.

Os coeficientes de atrito de rolamento obtidos sobre a superfície de vidro foram menores do que no acrílico, confirmando a teoria do contato mais superficialmente das partículas com a placa, enquanto que para superfície de acrílico, houve maior encaixe das microirregularidades.

Observando as Figuras 39 e 40, pode-se ver que o comprimento medido pela agulha do rugosímetro foi em torno de 1,20 mm. No entanto todas as esferas possuem diâmetros maiores que essa medida, indicando que a rugosidade superficial das partículas entra em contato instantaneamente com toda a superfície analisada pela agulha do rugosímetro.

Com isso, deve-se considerar que o perfil do vidro por microscopia confocal indica que é mais difícil um contato mais acentuado da partícula com essa placa, conforme demonstrado na Figura 48. Considerando que as microrregularidades das partículas e das placas não se encaixam perfeitamente, é nítido que as partículas terão contato com a placa vidro mais superficialmente ao contrário da placa de acrílico.

Figura 48 – Perfil de contato entre partícula e superfícies.



Fonte: Elaborada pela autora.

O coeficiente do tipo partícula-partícula não foi realizado devido à dificuldade em se obter um método eficiente para tal medida. Para isso, deve-se garantir que as partículas rolem

por outras partículas. Caso fosse empregada uma superfície feita com as próprias partículas, a partícula que estaria rolando iria encaixar nos espaços entre as partículas da superfície, sendo este fenômeno fisicamente inadequado para a técnica usada.

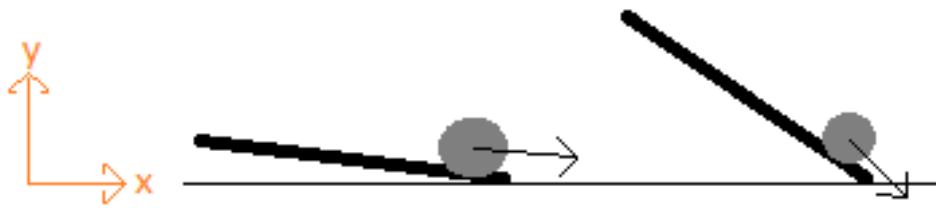
O coeficiente de atrito de rolamento foi ainda analisado pelo método do lançamento oblíquo feito em rampa inclinada, sendo que inicialmente foram feitas análises para diferentes ângulos e diferentes comprimentos para as partículas de ABS sem revestimento nas duas superfícies. As velocidades com que as partículas saíam da rampa foram medidas de três maneiras, sendo elas por análise de imagem gravadas em câmera de alta velocidade, por alcance horizontal e pela conservação de energia. Os resultados das velocidades das partículas de ABS sem revestimento para a superfície de acrílico estão apresentados na Tabela 7.

Enquanto as grandezas de altura e ângulo são medidas diretamente através de experimento, as velocidades são encontradas de maneira indireta. A velocidade de conservação de energia calculada pela Equação 27 indica que não há dissipação de energia, logo não há atrito entre a partícula e as superfícies utilizadas. Portanto, por se tratar de um modelo de corpo perfeitamente rígido, o coeficiente de atrito de rolamento é zero. No entanto, pode-se observar que tanto a velocidade encontrada pelo método de análise de imagens do ImageJ calculada pela Equação 36, quanto pelo alcance horizontal da Equação 25, são menores que a velocidade de conservação de energia, indicando que houve atrito entre as superfícies.

Observa-se também que as velocidades encontradas para o alcance horizontal são, em geral, menores do que as encontradas pela análise de imagens. Conforme o ângulo da rampa é aumentado, a partícula tem a tendência de seguir o movimento mais na direção vertical (eixo y) do que horizontal (eixo x), ou seja, ela acaba caindo antes da região que realmente deveria cair, mesmo a velocidade ficando cada vez maior.

Pela Equação 25 é possível verificar que a velocidade é diretamente proporcional à distância horizontal x que a partícula foi lançada. Logo, se a partícula sofre maior interferência da direção y do que da direção x , ela tem menor distância horizontal percorrida e consequentemente o resultado da velocidade será menor também. A Figura 49 explica bem o que acontece com a direção da partícula conforme aumento do ângulo da rampa.

Figura 49 – Demonstração das direções da partícula conforme elevação da rampa.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 7 – Velocidade média de rolamento – ABS sem revestimento [m/s] $\pm \sigma$ em acrílico.

Ângulo (°)/Com- primento (m)	ImageJ					Alcance Horizontal					Conservação de Energia				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
5	0,451	0,627	0,762	0,865	0,968	0,477	0,608	0,770	0,900	0,973	0,496	0,701	0,858	0,991	1,108
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±					
	0,018	0,013	0,016	0,029	0,015	0,012	0,007	0,007	0,004	0,022					
10	0,666	0,966	1,161	1,305	1,470	0,635	0,934	1,117	1,239	1,346	0,699	0,989	1,211	1,399	1,564
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±					
	0,006	0,009	0,014	0,018	0,027	0,005	0,013	0,022	0,022	0,040					
14	0,803	1,089	1,371	1,591	1,719	0,806	1,088	1,275	1,410	1,529	0,826	1,168	1,43	1,651	1,846
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±					
	0,016	0,030	0,035	0,023	0,041	0,032	0,036	0,004	0,016	0,016					
17	0,871	1,225	1,499	1,721	1,961	0,883	1,161	1,357	1,512	1,584	0,908	1,283	1,572	1,815	2,029
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±					
	0,020	0,012	0,008	0,027	0,012	0,010	0,035	0,013	0,017	0,011					
23	1,023	1,437	1,768	2,009	2,259	0,991	1,300	1,495	1,607	1,728	1,049	1,484	1,817	2,098	2,346
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±					
	0,013	0,025	0,019	0,036	0,025	0,018	0,014	0,022	0,018	0,033					

29	1,145	1,605	1,980	2,266	2,566	1,130	1,422	1,616	1,717	1,804	1,169	1,653	2,024	2,337	2,613
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±					
	0,009	0,016	0,020	0,015	0,022	0,016	0,020	0,016	0,032	0,050					
31	1,124	1,559	1,903	2,161	2,211	1,177	1,522	1,684	1,802	1,824	1,205	1,703	2,086	2,409	2,693
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±					
	0,021	0,024	0,059	0,058	0,134	0,005	0,040	0,036	0,038	0,017					
35	1,242	1,752	2,114	2,419	2,732	1,210	1,620	1,784	1,904	1,917	1,271	1,798	2,202	2,542	2,842
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±					
	0,027	0,025	0,021	0,042	0,068	0,019	0,044	0,041	0,042	0,020					

Fonte: Elaborada pela autora.

As distâncias horizontais (eixo x) alcançadas pela esfera de ABS sem revestimento após saírem da rampa estão apresentadas na Tabela 8. Na Tabela 9 estão apresentados os coeficientes de atrito de rolamento no acrílico para as partículas de ABS sem revestimento calculados pela Equação 20 para as velocidades obtidas pelo ImageJ e pelo alcance horizontal.

Tabela 8 – Distância alcançada ($m \pm \sigma$) para ABS sem revestimento em acrílico.

Comprimento (m)	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Ângulo (°)					
5	0,205 ± 0,005	0,262 ± 0,003	0,334 ± 0,003	0,393 ± 0,002	0,428 ± 0,010
10	0,267 ± 0,002	0,396 ± 0,005	0,478 ± 0,009	0,538 ± 0,009	0,592 ± 0,017
14	0,330 ± 0,013	0,450 ± 0,014	0,535 ± 0,001	0,602 ± 0,007	0,664 ± 0,007
17	0,353 ± 0,004	0,471 ± 0,013	0,559 ± 0,005	0,635 ± 0,006	0,681 ± 0,004
23	0,375 ± 0,006	0,499 ± 0,005	0,587 ± 0,008	0,649 ± 0,006	0,716 ± 0,012
29	0,395 ± 0,005	0,509 ± 0,006	0,595 ± 0,005	0,655 ± 0,010	0,712 ± 0,014
31	0,400 ± 0,001	0,526 ± 0,011	0,602 ± 0,011	0,668 ± 0,011	0,705 ± 0,006
35	0,388 ± 0,005	0,525 ± 0,012	0,601 ± 0,011	0,667 ± 0,012	0,704 ± 0,006

Fonte: Elaborada pela autora.

Observa-se que a distância aumenta com o aumento do ângulo e com o comprimento da rampa, uma vez que a velocidade de saída da partícula através da rampa também é maior.

O coeficiente de atrito de rolamento é uma medida adimensional e constante que, segundo os dados obtidos nesse experimento do método da norma ASTM G194-08, se aproxima de 0,02 para as esferas de ABS sem revestimento no acrílico (Tabela 9). Para os dados obtidos com ImageJ, observa-se que seus valores variaram de 0,013 a 0,037. Porém, a grande maioria se concentrou na faixa de 0,02, indicando que esse pode ser o valor correto do coeficiente para essa partícula considerada lisa e rígida. No entanto, a grande variação dos resultados do coeficiente se deve principalmente à sensibilidade que a Equação 20 tem em relação à velocidade. Caso a velocidade varie 0,01 unidade, o coeficiente muda de valor.

Tabela 9 – Coeficiente de atrito de rolamento em ImageJ e pelo alcance horizontal (μ_r [] $\pm \sigma$) – ABS sem revestimento em acrílico.

Comprimento (m)	ImageJ					Alcance Horizontal				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
5	0,024	0,012	0,016	0,020	0,020	0,017	0,016	0,015	0,015	0,019
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,002	0,004	0,003	0,005	0,002	0,004	0,002	0,001	0,001	0,003
10	0,013	0,014	0,014	0,024	0,021	0,031	0,025	0,026	0,039	0,046
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,003	0,003	0,004	0,004	0,006	0,005	0,004	0,006	0,005	0,008
14	0,026	0,022	0,016	0,017	0,033	0,024	0,013	0,048	0,067	0,078
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,009	0,012	0,012	0,007	0,011	0,018	0,005	0,001	0,004	0,004
17	0,022	0,027	0,031	0,031	0,014	0,014	0,055	0,077	0,094	0,119
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,013	0,005	0,007	0,009	0,005	0,007	0,015	0,004	0,005	0,003
23	0,020	0,030	0,023	0,037	0,032	0,045	0,102	0,138	0,177	0,195
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,010	0,014	0,009	0,014	0,009	0,014	0,007	0,009	0,005	0,009
29	0,016	0,032	0,026	0,035	0,022	0,031	0,144	0,202	0,256	0,291
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,009	0,010	0,032	0,007	0,009	0,015	0,012	0,007	0,011	0,013
31	0,072	0,095	0,100	0,116	0,195	0,021	0,119	0,209	0,264	0,325
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,020	0,016	0,031	0,026	0,049	0,005	0,025	0,017	0,014	0,005
35	0,027	0,031	0,053	0,064	0,052	0,061	0,021	0,239	0,306	0,381
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,029	0,019	0,013	0,022	0,032	0,020	0,031	0,021	0,017	0,007

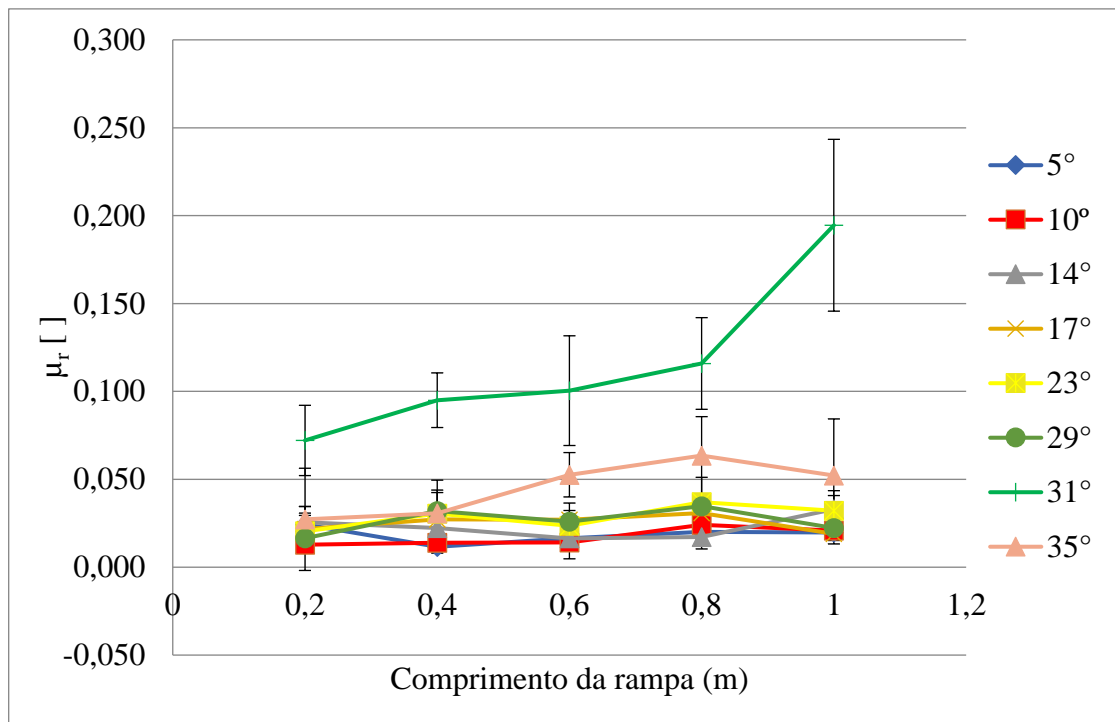
Fonte: Elaborada pela autora.

Por se tratar de partículas com circularidade muito próxima de 1, a quantidade de área de contato desse grupo de partículas é praticamente constante, indicando que não houve interferência desse parâmetro no coeficiente. Além disso, o raio de giração k é comparado a de uma

esfera ideal, ou seja, $k^2 = 2R^2/5$, por isso, o cálculo do coeficiente para essas partículas será influenciado basicamente pela velocidade encontrada.

Os resultados das duas tabelas podem ser vistos nos gráficos das Figuras 50 e 51.

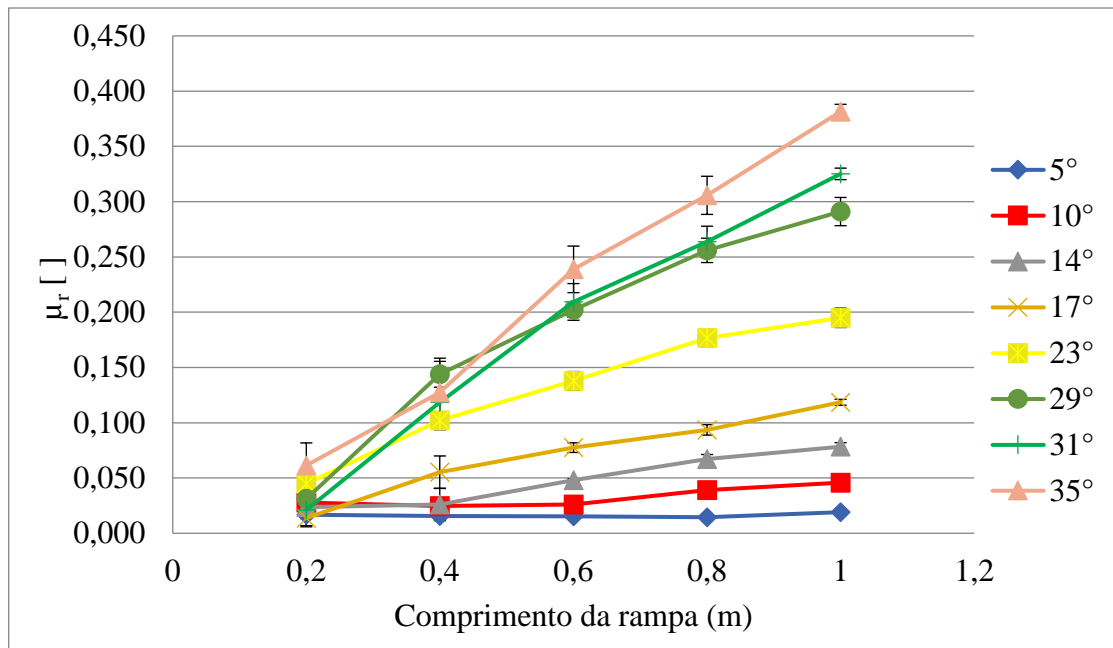
Figura 50 – Coeficiente de atrito de rolamento para ABS sem revestimento medidos pelo ImageJ no acrílico.



Fonte: Elaborada pela autora.

Pode-se observar na Figura 50 que o coeficiente tende a ser constante, apenas apresentando pequenas variações, já que os pontos de todos os ângulos indicam praticamente o mesmo valor de coeficiente próximo a 0,02. A exceção fica por conta do ângulo de 31°, o qual apresentou valores de coeficiente bem acima de 0,02 em todos os comprimentos analisados. Neste caso, as velocidades encontradas no ImageJ foram maiores, como pode-se ver na Tabela 6. Isso significa que a dissipação de energia por atrito foi menor, conseqüentemente é possível dizer que a partir desse ângulo a partícula começa a deslizar ao invés de rolar pela superfície acrílica. Logo o coeficiente de atrito de rolamento deixa de existir e passa a se contar com o coeficiente de atrito de deslizamento.

Figura 51 – Coeficiente de atrito de rolamento para ABS sem revestimento medidos pelo alcance horizontal no acrílico.



Fonte: Elaborada pela autora.

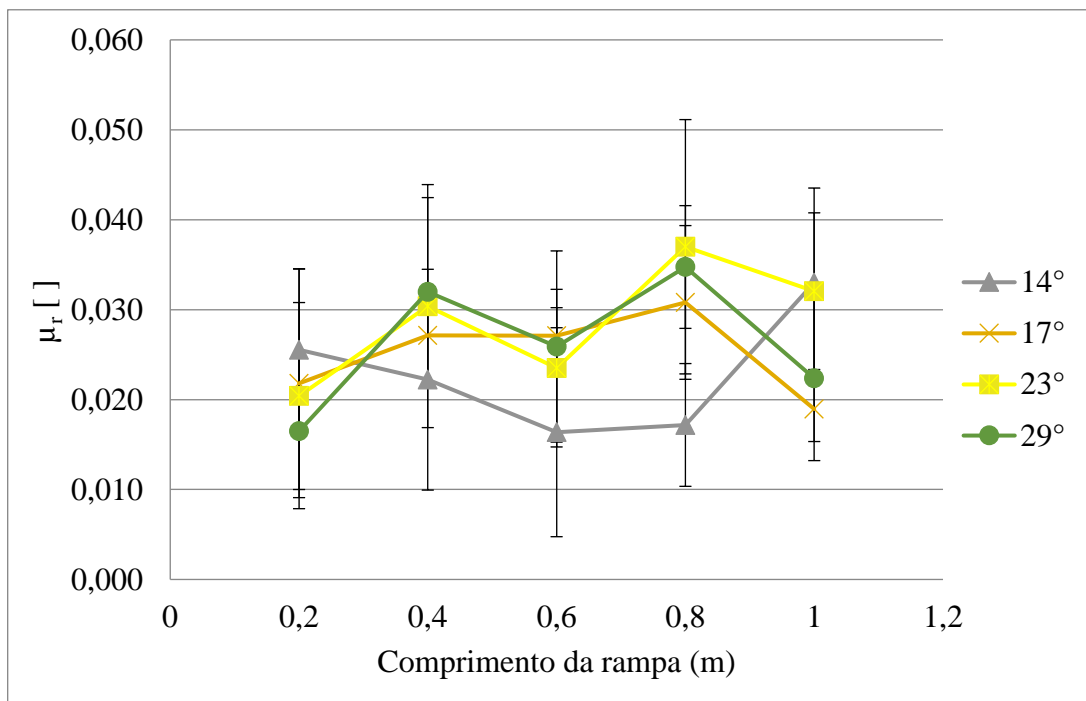
Já a Figura 51 mostra os valores de coeficiente de atrito de rolamento utilizando as velocidades medidas pelo alcance horizontal. Neste gráfico, é possível ver que apenas os ângulos abaixo de 31° e no comprimento de 0,2m obtiveram valores de coeficiente próximos a 0,02. Isso porque, nesse comprimento, a partícula tem velocidade suficientemente maior na direção x do que na direção y, porém não tão grande quanto comparadas com os outros comprimentos. Conforme o ângulo é elevado, a esfera passa a ter maior influência da velocidade na direção y e caindo antes da direção horizontal que realmente deveria cair.

No equacionamento, leva-se em conta que a partícula deve atingir a distância mínima na direção x antes de tocar o chão. Ou seja, para as maiores velocidades, seria necessário adaptar o equipamento, aumentando a altura dele em relação ao chão, o que era inviável. Com isso, a distância é menor, diminuindo a velocidade e consequentemente obtendo maior coeficiente de atrito. Por isso, é observado o aumento progressivo do coeficiente variando tanto o ângulo, quanto o comprimento.

Outro detalhe que pode ser observado é que, para algumas partículas, o coeficiente é menor no ângulo de 10° em relação ao de 5°. Goya (2014) descreve que para ângulos abaixo de 14° há possivelmente uma má distribuição de forças sobre a partícula, o que contribui para possíveis erros de medições do coeficiente de rolamento pelo método do lançamento oblíquo.

Sendo assim, a Figura 52 apresenta os coeficientes de atrito de rolamento para as partículas de ABS sem revestimento no acrílico obtidos pelo método de análise de imagem no ImageJ, eliminando os ângulos de 5 e 10° e também os ângulos onde passa a acontecer deslizamento, sendo a partir de 31° (tratamento da Figura 50).

Figura 52 – Coeficiente de atrito de rolamento para ABS sem revestimento no acrílico eliminando ângulos que tem distribuição irregular de forças.



Fonte: Elaborada pela autora.

Pela Figura 52 é possível observar que há uma grande variação do coeficiente de rolamento para as partículas de ABS sem revestimento. A explicação para esse acontecimento pode ser pelo aumento do comprimento que a esfera rola, pois nada garantiu que ela rolasse linearmente pela ripa de acrílico, conseqüentemente pode ter acontecido uma diminuição da velocidade de saída da partícula através da rampa. Houve ainda uma dificuldade para analisar as imagens para encontrar a velocidade, causando impacto nos resultados diversos do coeficiente.

Porcelana	0,038	0,041	0,066	0,074	0,059	0,119	0,114	0,146
	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,001	0,006	0,004	0,011	0,016	0,013	0,021	0,057

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 11 – Coeficiente de atrito de rolamento ($\mu_r [] \pm \sigma$), medidos pelo alcance horizontal em acrílico.

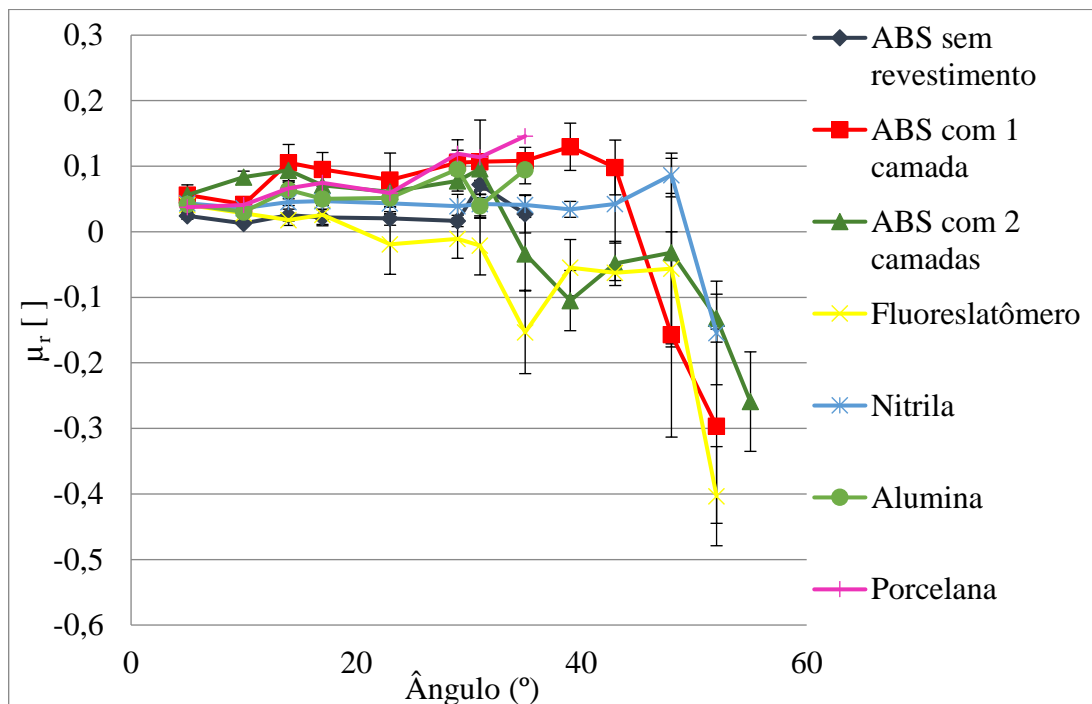
Partícula	Ângulo													
	5	10	14	17	23	29	31	35	39	43	48	52	55	
ABS sem revestimento	0,017	0,028	0,024	0,014	0,045	0,031	0,021	0,062						
	±	±	±	±	±	±	±	±						
	0,004	0,002	0,018	0,007	0,014	0,015	0,005	0,020						
ABS com 1 camada de revestimento	0,042	0,041	0,098	0,065	0,068	0,097	0,092	0,077	0,151	0,191	0,155	0,387		
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±		
	0,008	0,013	0,017	0,017	0,021	0,033	0,023	0,033	0,039	0,042	0,090	0,093		
ABS com 2 camadas de revestimento	0,052	0,084	0,090	0,086	0,078	0,081	0,076	0,128	0,183	0,243	0,278	0,389	0,757	
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
	0,002	0,009	0,012	0,006	0,010	0,027	0,034	0,031	0,036	0,034	0,053	0,069	0,135	
Fluorelastômero	0,037	0,035	0,036	0,055	0,042	0,068	0,058	0,064	0,183	0,240	0,287	0,395		
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±		
	0,007	0,004	0,005	0,007	0,003	0,015	0,018	0,025	0,020	0,012	0,060	0,016		

Nitrila	0,037	0,012	0,040	0,044	0,042	0,057	0,070	0,116	0,184	0,254	0,307	0,457
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
Alumina	0,007	0,025	0,004	0,008	0,004	0,018	0,025	0,029	0,028	0,060	0,043	0,053
	0,027	0,025	0,038	0,035	0,042	0,036	0,025					
Porcelana	±	±	±	±	±	±	±					
	0,004	0,002	0,007	0,005	0,003	0,018	0,012					
	0,021	0,020	0,027	0,048	0,039	0,030	0,030					
	±	±	±	±	±	±	±					
	0,002	0,003	0,010	0,005	0,007	0,020	0,013					

Fonte: Elaborada pela autora.

Ainda para a superfície de acrílico, as outras partículas mais rugosas também foram analisadas quanto ao coeficiente, sendo mostrados os valores nas Tabelas 10 e 11 e nas Figuras 53 e 54. Neste caso, foi fixado o comprimento de 0,2 m para todos os dados, já que, como observados para a análise das partículas de ABS sem revestimento, neste comprimento a variação de coeficiente é menor. Além disso, a coleta de dados foi facilitada, já que, em comprimentos maiores, mais análises eram descartadas, pois as partículas poderiam bater nas laterais da rampa.

Figura 53 – Coeficiente de atrito de rolamento para partículas rígidas com velocidades retiradas pelo ImageJ em acrílico.



Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 53 mostra os dados de coeficiente de rolamento utilizando a velocidade final calculada pelo método de análise de imagens do ImageJ. É possível observar que, para quase todas as partículas analisadas, há uma redução do valor do coeficiente do ângulo de 5 para 10°. Logo, é possível confirmar que nesses ângulos a partícula tem uma má distribuição das forças, como proposto por Goya (2014).

Pelo gráfico é possível observar que apenas para as partículas de ABS sem revestimento e nitrila os valores do coeficiente se apresentaram constante até determinado ângulo (31°

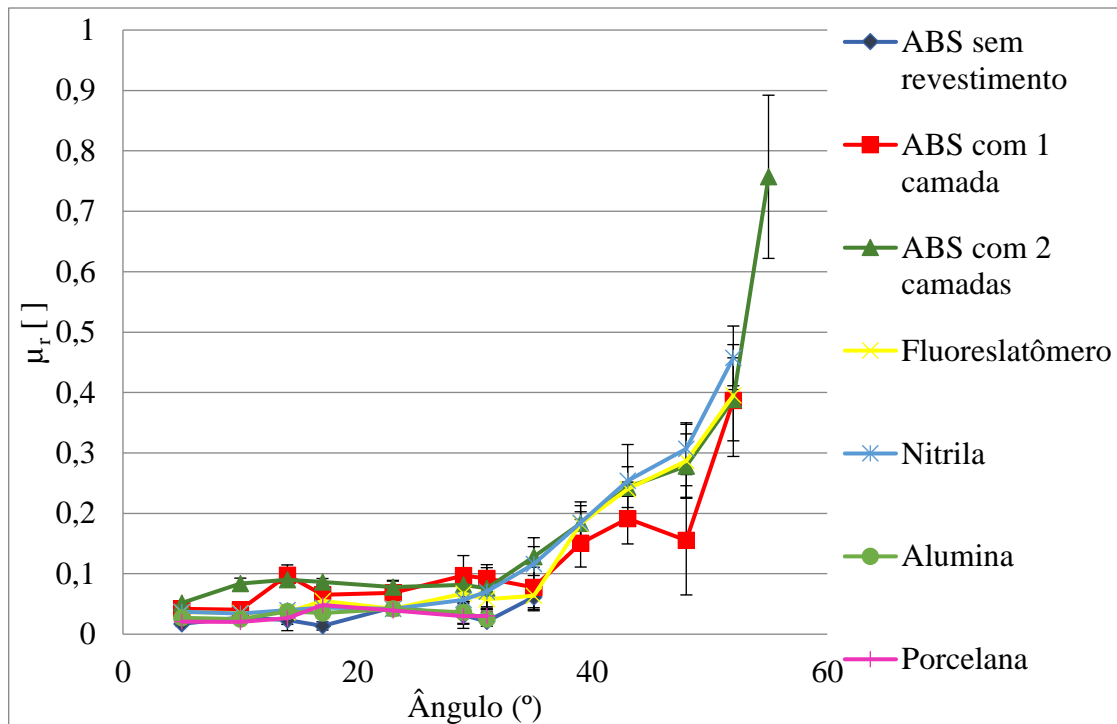
para ABS e 48° para nitrila), sendo ele o ângulo em que é possível dizer que a partícula passou a deslizar ao invés de rolar. Mas, em comparação com a determinação do coeficiente de rolamento pelo método da norma ASTM G194-08, as duas partículas apresentaram valores muito próximos, sendo aproximadamente 0,02 para ABS sem revestimento e 0,04 para nitrila nas duas metodologias (Tabelas 6 e 9 para o acrílico, respectivamente).

As partículas de ABS com revestimento se apresentaram bastante instáveis na determinação do coeficiente. Isso possivelmente foi devido ao mal recobrimento das partículas. Observa-se também que em determinado ângulo, os coeficientes para essas partículas ficam negativos, o que é impossível, já que esses valores indicariam que a velocidade com que a partícula sai da rampa seria maior que a velocidade de conservação de energia. Para acontecer isso, a partícula deve ganhar energia de qualquer outra fonte. Quando observado melhor as imagens em flash no software ImageJ, foi possível observar que essas partículas se soltaram da rampa conforme a elevação do ângulo, perdendo o contato com a superfície, portanto, não pode mais pedir o atrito.

Já para as partículas de fluorelastômero, não é possível dizer exatamente o porquê dos coeficientes obtidos negativamente. Por se tratar de partículas que possuem aglomerado filamentosos (como vistos na Figura 35), pode-se imaginar que a interferência da rugosidade deve acontecer de maneira diferente comparada às demais partículas. Sendo assim, é necessário um melhor estudo de como sua interferência age sobre o coeficiente. A princípio, pode-se prever que esses filamentos são os responsáveis por aumentar a velocidade das partículas.

Devido à orientação da partícula mudar conforme aumento do ângulo de inclinação (como explicado anteriormente e mostrado na Figura 49), não foi possível determinar o coeficiente de rolamento para ângulos mais altos. No entanto, como se está analisando apenas a interferência da rugosidade sobre o coeficiente de atrito, seu resultado deveria ser constante para cada tipo de partícula, o que pode ser observado aparentemente até o ângulo de 23° obtido pelo alcance horizontal (Tabela 10, Figura 54). Para as partículas de ABS sem revestimento e nitrila, por exemplo, seus valores se mantiveram em aproximadamente 0,02 e 0,04, respectivamente.

Figura 54 – Coeficiente de atrito de rolamento para partículas rígidas com velocidades retiradas pelo alcance horizontal em acrílico.



Fonte: Elaborada pela autora.

Para as partículas de ABS com revestimento, é possível verificar nas Tabelas 10 e 11 que os coeficientes estão bem acima dos obtidos pelo método da norma ASTM G194-08, sendo aproximadamente 0,9 para o lançamento oblíquo nas duas partículas e aproximadamente 0,3 para o método da norma.

Os valores dos coeficientes para as partículas de alumina e porcelana não se aproximaram quando comparados os métodos da norma ASTM G194-08 e do lançamento oblíquo feito com a velocidade do ImageJ. Porém, mesmo com a circularidade menor, é possível dizer que o coeficiente se aproxima de 0,036 e 0,025 para alumina e porcelana, respectivamente, já que o método de velocidade pelo alcance horizontal em ângulos menores apresentou valores próximos aos obtidos pela norma. O raio de giração dessas partículas possivelmente foi o responsável pelo desvio dos resultados obtidos. No entanto, é necessário um melhor estudo desse parâmetro.

Tabela 12 – Velocidade média de rolamento – ABS sem revestimento [m/s] $\pm \sigma$ em vidro.

Ângulo (°)	ImageJ					Alcance Horizontal					Conservação de Energia				
	Comprimento (m)					Comprimento (m)					Comprimento (m)				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
5	0,437	0,587	0,708	0,826	0,927	0,354	0,519	0,620	0,734	0,822	0,569	0,831	1,022	1,175	1,311
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±					
	0,005	0,018	0,030	0,018	0,014	0,004	0,012	0,031	0,005	0,013					
10	0,656	0,932	1,132	1,267	1,267	0,666	0,941	1,096	1,218	1,298	0,819	1,175	1,432	1,662	1,852
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±					
	0,013	0,010	0,014	0,046	0,046	0,003	0,007	0,022	0,027	0,026					
14	0,768	1,074	1,314	1,505	1,695	0,800	1,084	1,259	1,421	1,533	1,003	1,361	1,679	1,951	2,185
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±					
	0,010	0,005	0,026	0,016	0,021	0,008	0,018	0,011	0,012	0,019					
17	0,890	1,241	1,467	1,704	1,916	0,887	1,183	1,382	1,532	1,610	1,069	1,519	1,858	2,148	2,404
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±					
	0,009	0,022	0,030	0,029	0,045	0,007	0,017	0,008	0,020	0,035					
23	1,037	1,470	1,795	2,062	2,292	1,021	1,370	1,524	1,641	1,706	1,24	1,765	2,153	2,488	2,78
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±					
	0,011	0,024	0,015	0,035	0,040	0,012	0,123	0,024	0,046	0,068					

29	1,151	1,643	1,993	2,338	2,612	1,141	1,488	1,694	1,739	1,837	1,376	1,956	2,4	2,77	3,099
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±					
	0,024	0,034	0,013	0,027	0,045	0,007	0,016	0,027	0,034	0,037					
31	1,243	1,811	2,177	2,558	2,837	1,165	1,499	1,645	1,752	1,808	1,418	2,011	2,468	2,847	3,187
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±					
	0,018	0,021	0,033	0,045	0,028	0,011	0,016	0,018	0,032	0,019					

Fonte: Elaborada pela autora.

Assim como as análises realizadas para a placa de acrílico, as velocidades obtidas pela Equação 25 também é diretamente proporcional à distância horizontal x que a partícula foi lançada. A Tabela 12 mostra os resultados para as velocidades médias obtidas para as partículas de ABS sem revestimento sobre a superfície de vidro.

Para as distâncias horizontais (eixo x), alcançadas pela esfera de ABS sem revestimento após saírem da rampa de vidro, estão apresentadas na Tabela 13. Na Tabela 14 estão apresentados os coeficientes de atrito de rolamento no vidro para as mesmas partículas utilizando o método de análise do ImageJ e do alcance horizontal (Figuras 55 e 56). Lembrando que os resultados foram calculados pela Equação 20 para as velocidades obtidas.

Tabela 13 – Distância alcançada ($m \pm \sigma$) para ABS sem revestimento em vidro.

Comprimento (m)	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Ângulo (°)					
5	$0,205 \pm 0,005$	$0,262 \pm 0,003$	$0,334 \pm 0,003$	$0,393 \pm 0,002$	$0,428 \pm 0,010$
10	$0,267 \pm 0,002$	$0,396 \pm 0,005$	$0,478 \pm 0,009$	$0,538 \pm 0,009$	$0,592 \pm 0,017$
14	$0,330 \pm 0,013$	$0,450 \pm 0,014$	$0,535 \pm 0,001$	$0,602 \pm 0,007$	$0,664 \pm 0,007$
17	$0,353 \pm 0,004$	$0,471 \pm 0,013$	$0,559 \pm 0,005$	$0,635 \pm 0,006$	$0,681 \pm 0,004$
23	$0,375 \pm 0,006$	$0,499 \pm 0,005$	$0,587 \pm 0,008$	$0,649 \pm 0,006$	$0,716 \pm 0,012$
29	$0,395 \pm 0,005$	$0,509 \pm 0,006$	$0,595 \pm 0,005$	$0,655 \pm 0,010$	$0,712 \pm 0,014$
31	$0,400 \pm 0,001$	$0,526 \pm 0,011$	$0,602 \pm 0,011$	$0,668 \pm 0,011$	$0,705 \pm 0,006$
35	$0,388 \pm 0,005$	$0,525 \pm 0,012$	$0,601 \pm 0,011$	$0,667 \pm 0,012$	$0,704 \pm 0,006$

Fonte: Elaborada pela autora.

Quando comparados os resultados das Tabelas 9 e 14, é possível verificar que os resultados das análises para coeficiente de atrito de rolamento das partículas de ABS sem revestimento, sobre a superfície de vidro, foram maiores que para os valores obtidos na superfície de acrílico. Quando se leva em consideração que a rugosidade do vidro é menor que a do acrílico, era de se esperar que os resultados de coeficientes encontrados na superfície vítrea fossem menores. Além disso, ao analisar a Figura 55, percebe-se que as partículas de ABS sem revestimento tem coeficientes de atrito de rolamento próximo a zero na superfície vítrea quando retirados os dados no ângulo de 29°, e fica negativo no ângulo de 31°, o que é inversamente observado para a superfície de acrílico (onde os coeficientes de atrito de rolamento aumentam seus valores nos ângulos de 31°).

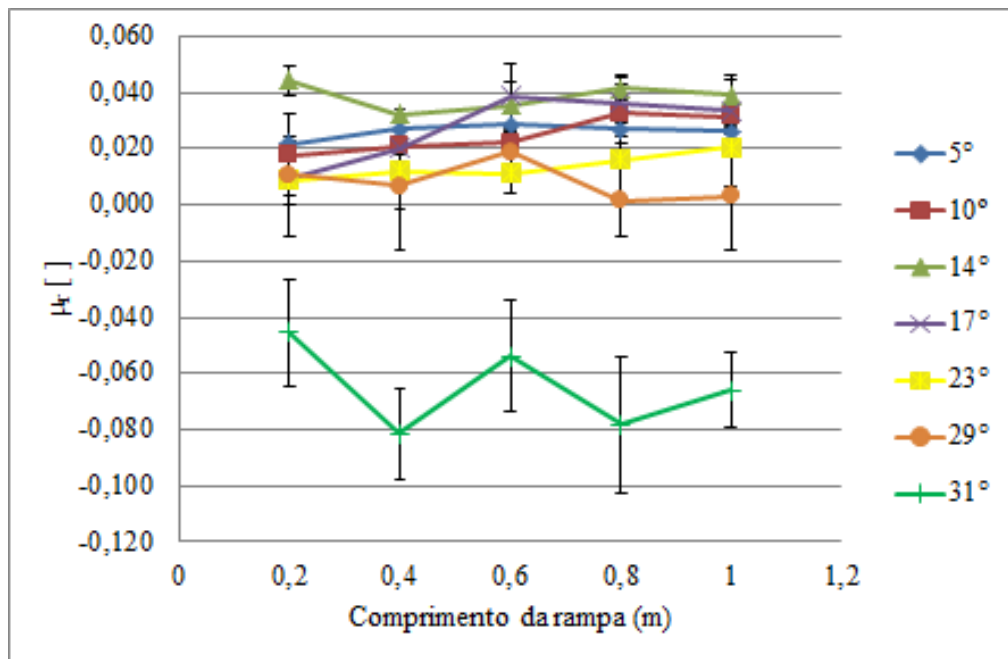
Sendo assim, pode-se perceber que, para a superfície de vidro, as partículas de ABS sem revestimento iniciam seus deslizamentos próximos ao ângulo de 29°, indicando que, possivelmente a interação dessas partículas com a superfície é menor comparado com a mesma interação na superfície de acrílico.

Tabela 14 – Coeficiente de atrito de rolamento em ImageJ e pelo alcance horizontal (μ_r [] $\pm \sigma$) – ABS sem revestimento em vidro.

Comprimento (m)	ImageJ					Alcance Horizontal				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
5	0,022 ±	0,027 ±	0,029 ±	0,027 ±	0,026 ±	0,044 ±	0,040 ±	0,042 ±	0,040 ±	0,039 ±
10	0,001 ±	0,004 ±	0,005 ±	0,003 ±	0,001 ±	0,001 ±	0,002 ±	0,004 ±	0,001 ±	0,002 ±
14	0,018 ±	0,021 ±	0,022 ±	0,033 ±	0,031 ±	0,013 ±	0,018 ±	0,032 ±	0,044 ±	0,055 ±
17	0,006 ±	0,003 ±	0,004 ±	0,010 ±	0,003 ±	0,002 ±	0,002 ±	0,006 ±	0,006 ±	0,005 ±
23	0,044 ±	0,032 ±	0,036 ±	0,042 ±	0,039 ±	0,027 ±	0,028 ±	0,053 ±	0,064 ±	0,077 ±
29	0,005 ±	0,002 ±	0,009 ±	0,004 ±	0,005 ±	0,005 ±	0,007 ±	0,003 ±	0,003 ±	0,004 ±
31	0,009 ±	0,020 ±	0,039 ±	0,036 ±	0,034 ±	0,011 ±	0,046 ±	0,069 ±	0,088 ±	0,114 ±
	0,006 ±	0,010 ±	0,011 ±	0,009 ±	0,013 ±	0,005 ±	0,008 ±	0,003 ±	0,006 ±	0,008 ±
	0,009 ±	0,012 ±	0,011 ±	0,016 ±	0,020 ±	0,022 ±	0,063 ±	0,127 ±	0,166 ±	0,200 ±
	0,009 ±	0,013 ±	0,007 ±	0,014 ±	0,014 ±	0,009 ±	0,068 ±	0,009 ±	0,015 ±	0,017 ±
	0,011 ±	0,007 ±	0,019 ±	0,001 ±	0,003 ±	0,021 ±	0,105 ±	0,167 ±	0,248 ±	0,281 ±
	0,022 ±	0,023 ±	0,007 ±	0,013 ±	0,019 ±	0,007 ±	0,010 ±	0,012 ±	0,012 ±	0,011 ±
	-0,045 ±	-0,082 ±	-0,054 ±	-0,078 ±	-0,066 ±	0,033 ±	0,133 ±	0,227 ±	0,282 ±	0,330 ±
	0,019 ±	0,016 ±	0,020 ±	0,024 ±	0,013 ±	0,010 ±	0,010 ±	0,008 ±	0,012 ±	0,006 ±

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 55 – Coeficiente de atrito de rolamento para partículas de ABS sem revestimento medidos pelo ImageJ no vidro.



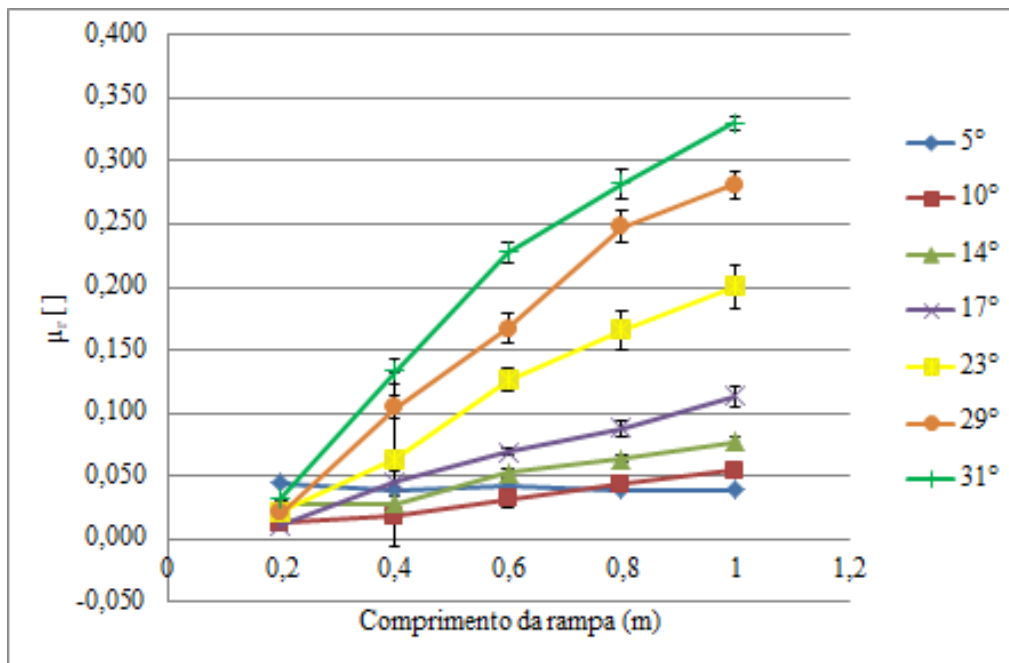
Fonte: Elaborado pela autora.

Além disso, é possível ver que os gráficos feitos no acrílico e no vidro são muito parecidos, só indicando que os coeficientes obtidos no vidro foram menores em geral. Confirma-se, então, que a placa de vidro é menos rugosa que a de acrílico.

A Figura 56 mostra os valores de coeficiente de atrito de rolamento utilizando as velocidades medidas pelo alcance horizontal. Observando-a, é possível ver que a tendência em aumento do coeficiente se mantém. A explicação se torna a mesma que para a superfície acrílica. Conforme o ângulo da rampa aumenta, a partícula tem a tendência de seguir o movimento a direção vertical (eixo y) do que horizontal (eixo x). Sendo assim, ela cai antes da região que realmente deveria cair e a velocidade fica cada vez maior.

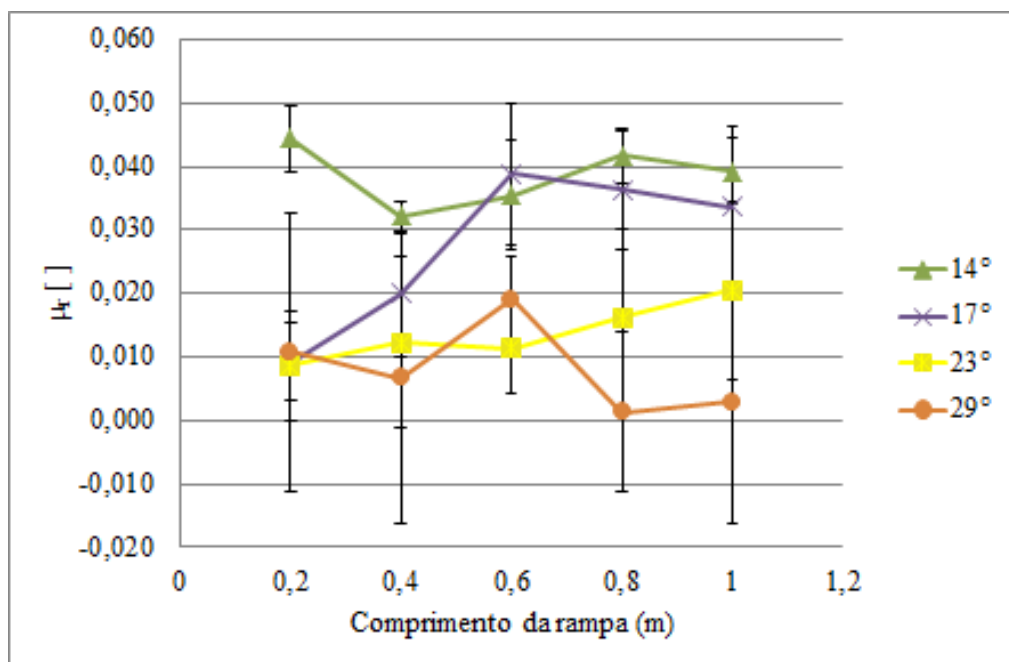
A Figura 57 apresenta os coeficientes de atrito de rolamento para as partículas de ABS sem revestimento sobre superfície de vidro obtidos pelo método de análise de imagem no ImageJ. Ela é obtida ao eliminar os ângulos de 5 e 10° e os ângulos onde passa acontecer deslizamento, sendo a partir de 31° (tratamento da Figura 55).

Figura 56 – Coeficiente de atrito de rolamento para partículas de ABS sem revestimento medidos pelo alcance horizontal no vidro.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 57 – Coeficiente de atrito de rolamento para ABS sem revestimento no vidro eliminando ângulos que tem distribuição irregular de forças.



Fonte: Elaborada pela autora.

Chegando às análises para o coeficiente de atrito de rolamento de todas as partículas, realizadas pelo método do lançamento oblíquo sobre superfície vítrea, quando se baseou nos resultados obtidos para a superfície de acrílico, optou-se por realizar os testes com a superfície de vidro apenas para o ângulo de 14°, mantendo-se o comprimento de 20 cm. Isso porque nestas medidas, a velocidade com que a partícula percorre a placa foi menor e o contato entre as superfícies é mais eficiente, além de que, quando se analisa a partícula no ImageJ, ela não se encontra distorcida e é possível saber onde se encontra o centro dela, o que torna mais confiável a análise de velocidade com que a partícula deixa a rampa e conseqüentemente o resultado do coeficiente. A Tabela 15 mostra os resultados para os coeficientes de atrito de rolamento para as demais partículas em superfície vítrea.

Tabela 15 – Valores dos coeficientes de atrito de rolamento ($\mu_{r_{pw}}$ [] $\pm \sigma$) para o ângulo de 14° e comprimento de 20cm.

Método Partícula / Placa	ImageJ		Alcance Horizontal	
	Acrílico	Vidro	Acrílico	Vidro
ABS com 1 camada de revestimento	0,105±0,028	0,055±0,042	0,098±0,017	0,054±0,008
ABS com 2 camadas de revestimento	0,094±0,019	0,062±0,014	0,090±0,012	0,060±0,007
Fluorelastômero	0,018±0,008	0,027±0,019	0,036±0,005	0,0035±0,005
Nitrila	0,045±0,005	0,026±0,008	0,040±0,004	0,037±0,007
Alumina	0,064±0,008	0,042±0,014	0,038±0,007	0,011±0,004
Porcelana	0,066±0,004	0,050±0,007	0,027±0,010	0,008±0,006

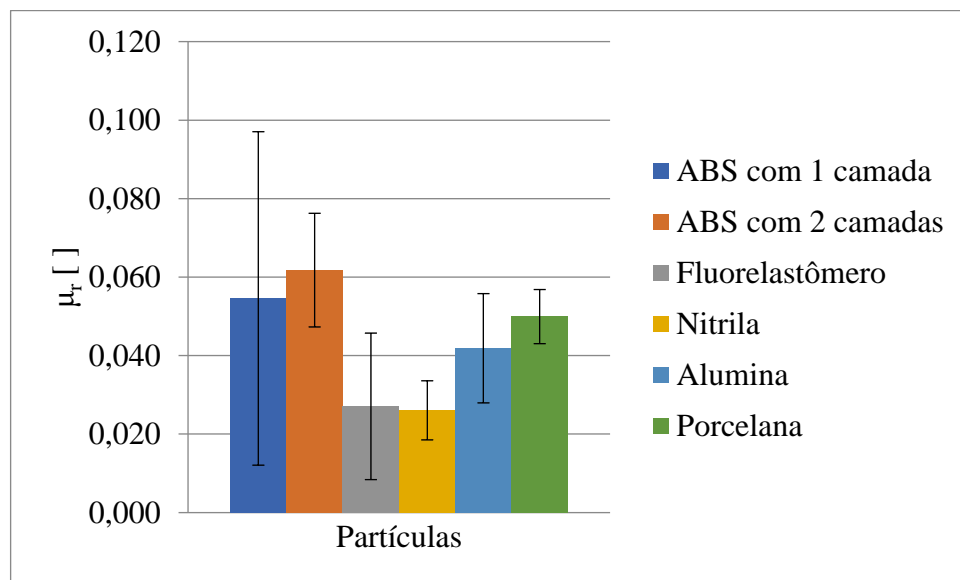
Fonte: Elaborada pela autora.

As Figuras 58 e 59 mostram os resultados obtidos para os coeficientes de atrito de rolamento para as demais partículas quando analisados no método de lançamento oblíquo em superfície vítrea, sendo o primeiro gráfico para análise em ImageJ e o segundo para análise de alcance horizontal.

Fica evidenciado que os coeficientes de atrito de rolamento se apresentam maiores para as partículas de ABS com revestimento, sendo essas partículas também as que

apresentaram maiores valores de coeficiente de atrito de rolamento tanto na superfície acrílica quanto na vítrea.

Figura 58 – Dados de coeficiente de atrito de rolamento das demais partículas pelo método de análise do ImageJ na superfície de vidro com ângulo de 14° e comprimento de 20 cm fixos.

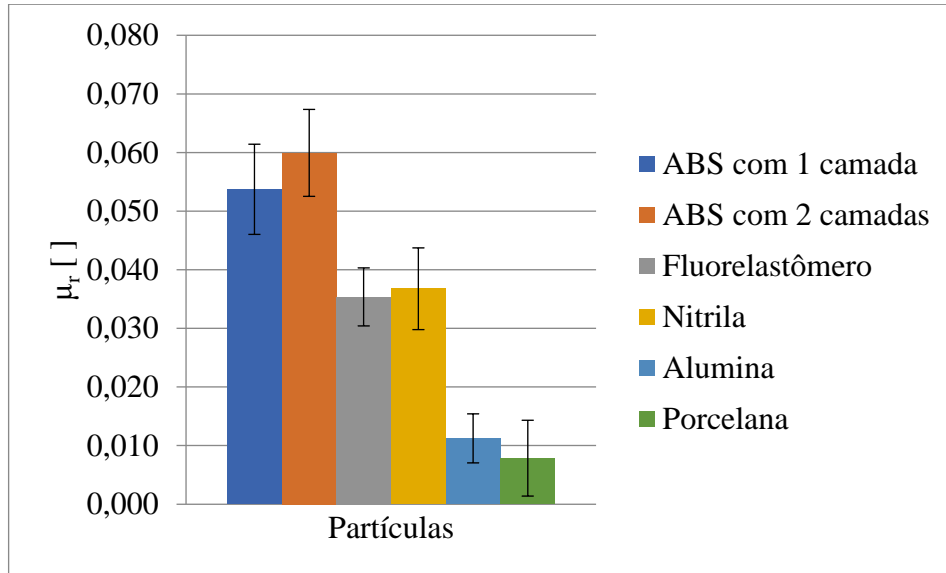


Fonte: Elaborada pela autora.

É possível fazer um comparativo entre os métodos descritos neste projeto para as análises de coeficiente de atrito de rolamento, sendo mostrado nas Figuras 57 e 58. Como as análises do coeficiente para o método de lançamento oblíquo feitas em superfície acrílica obtiveram grande variação de valores, já que foram feitas análises para diversos ângulos, para se encontrar um valor representativo do coeficiente de atrito de rolamento para cada tipo de partícula, fez-se a seguinte consideração: a partir da média relatada nas Tabelas 14 e 15, foi feita a média dos valores de coeficiente, iniciando no ângulo de 14° e terminando no ângulo em que o valor do coeficiente de ângulo seguinte desviasse no mínimo 25% em relação à média baseada nos ângulos anteriores.

Para explicar melhor como foram encontrados os valores dos coeficientes de atrito de rolamento no método da rampa inclinada, tanto com os dados obtidos pelo método de análise do ImageJ, quanto no método do alcance horizontal, as Tabelas 16 e 17, apresentam os resultados obtidos na análise do critério estabelecido.

Figura 59 – Dados de coeficiente de atrito de rolamento das demais partículas pelo método de análise do alcance horizontal na superfície de vidro com ângulo de 14° e comprimento de 20 cm fixos.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 16 – Resultados da média das médias dos coeficientes de atrito de rolamento ($\mu_{r_{pw}}[\] \pm \sigma$) para todas as partículas obtidos pelo ImageJ – superfície acrílica.

Partícula	Média	Desvio em %	Ângulo já não selecionado para a média
ABS sem revestimento	0,023 ± 0,003	27,0375	29°
ABS com 1 camada	0,100 ± 0,011	-29,697	39°
ABS com 2 camadas	0,076 ± 0,017	-26,477	31°
Fluorelastômero	0,018 ± 0,047	-42,931	17°
Nitrila	0,043 ± 0,001	-101,52	48°
Alumina	0,065 ± 0,007	39,4541	31°
Porcelana	0,067 ± 0,009	-79,263	29°

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 17 – Resultados da média das médias dos coeficientes para todas as partículas obtidos pelo alcance horizontal – superfície acrílica.

Partícula	Média	Desvio em %	Ângulo já não selecionado para a média
ABS sem revestimento	0,028 ± 0,016	25,2037	29°
ABS com 1 camada	0,083 ± 0,014	-81,392	39°
ABS com 2 camadas	0,082 ± 0,005	-56,062	31°
Fluorelastômero	0,036 ± 0,019	-52,475	17°
Nitrila	0,042 ± 0,002	-34,344	48°
Alumina	0,038 ± 0,003	34,0645	31°
Porcelana	0,035 ± 0,009	-	-

Fonte: Elaborada pela autora.

Com isso, surge a Tabela 18, que apresenta os resultados gerais dessa análise. Como é possível observar na Tabela 18, a tendência de coeficientes de atrito de rolamento é maior nos três métodos quando utilizada placa de acrílico, confirmando que este material é realmente mais rugoso que o vidro.

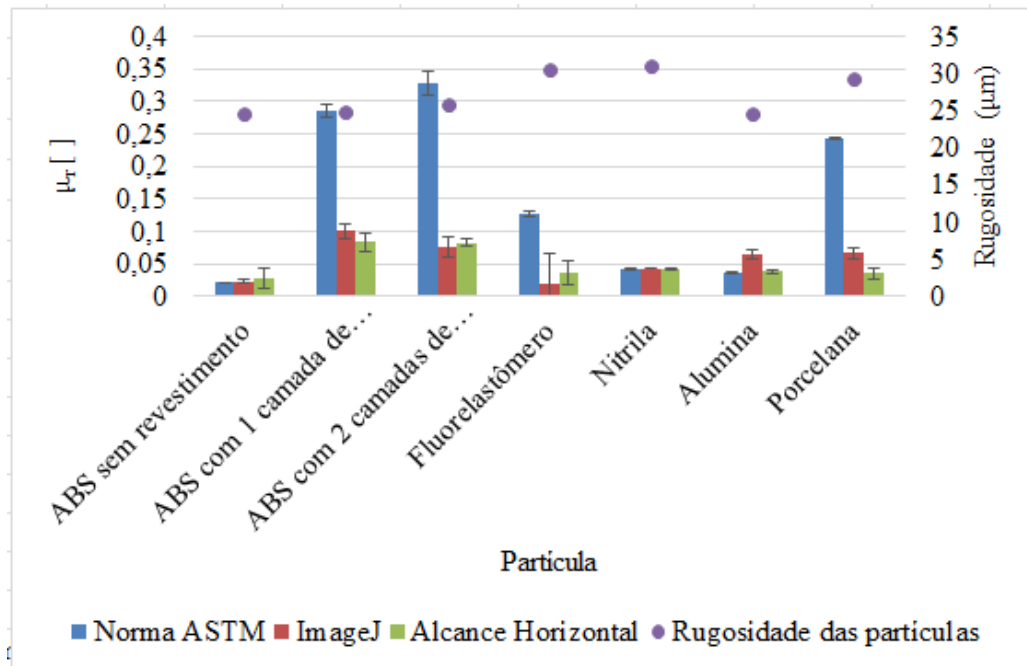
O destaque fica para as partículas de nitrila, que apresentou valores na escala 10^{-2} , enquanto que as partículas de ABS com revestimento em borracha apresentaram valores na escala 10^{-1} tanto no acrílico, quanto no vidro. Isso porque, quando se compara as imagens das microscopias confocais da borracha nitrílica (Figura 36), com as de ABS com revestimento (Figuras 33 e 34), é possível observar que as primeiras possuem mais homogeneidade, o que resultada em menor contato entre as microirregularidades das superfícies. Esse contato é realizado através de interações intermoleculares, portanto, quanto menos contato intermolecular, menor dissipação de energia. Já em relação às partículas de fluorelastômero, os aglomerados de filamento possuem interação diferenciada que devem ser melhor estudada.

Tabela 18 – Coeficiente de atrito de rolamento para comparativo entre os métodos.

Superfície	Acrílico			Vidro		
	Partícula / Método	Norma ASTM	ImageJ	Alcance Horizontal	Norma ASTM	ImageJ
ABS sem revestimento	0,021	0,023	0,028	0,020	0,044	0,027
	±	±	±	±	±	±
	0,001	0,003	0,016	0,000	0,005	0,005
ABS com 1 camada de revestimento	0,2852	0,100	0,083	0,169	0,055	0,054
	±	±	±	±	±	±
	0,011	0,011	0,014	0,006	0,042	0,008
ABS com 2 camadas de revestimento	0,3282	0,076	0,082	0,258	0,062	0,06
	±	±	±	±	±	±
	0,019	0,017	0,005	0,011	0,014	0,007
Fluorelastômero	0,126	0,018	0,036	0,097	0,027	0,035
	±	±	±	±	±	±
	0,004	0,047	0,019	0,005	0,019	0,005
Nitrila	0,041	0,043	0,042	0,037	0,026	0,037
	±	±	±	±	±	±
	0,001	0,001	0,002	0,001	0,008	0,007
Alumina	0,037	0,065	0,038	0,030	0,042	0,011
	±	±	±	±	±	±
	0,001	0,007	0,003	0,001	0,014	0,004
Porcelana	0,024	0,067	0,035	0,023	0,050	0,008
	±	±	±	±	±	±
	0,001	0,009	0,009	0,000	0,007	0,006

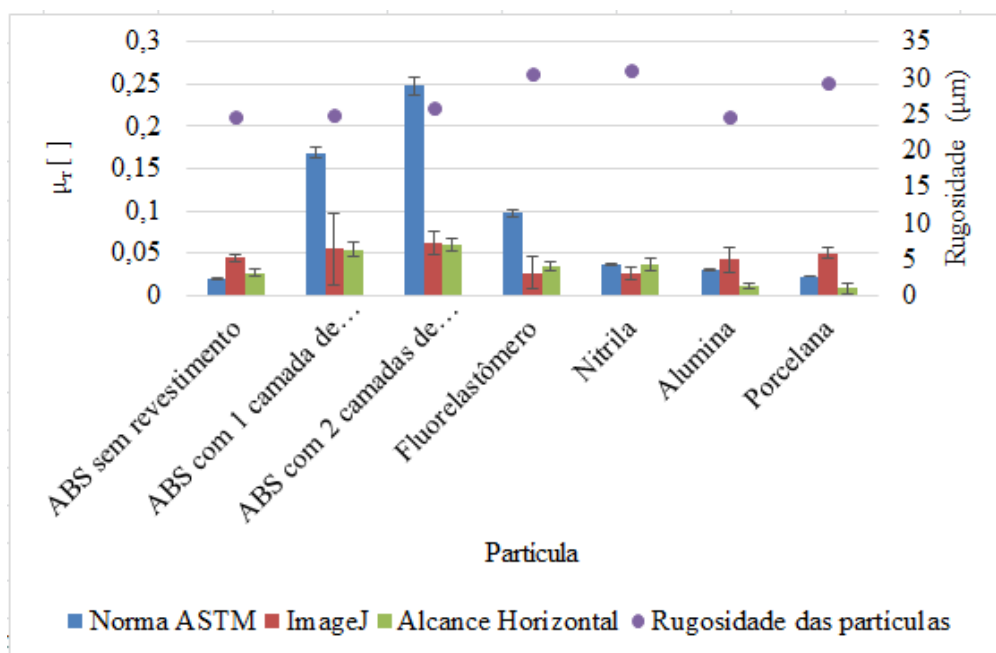
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 60 – Comparativo entre as metodologias para o coeficiente de atrito de rolamento sobre a placa de acrílico.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 61 – Comparativo entre as metodologias para o coeficiente de atrito de rolamento sobre a placa de vidro.



Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando as Figuras 60 e 61, mais uma vez é observado que as partículas mais rugosas não necessariamente são as que apresentam maior valor de coeficiente de atrito de rolamento, logo, pode-se concluir que este parâmetro não é influenciado apenas pela rugosidade, como foi citado na norma ASTM G194-08 (2008). Um detalhe que pode ser estudado para entender melhor os resultados são as forças adesivas, as quais podem ser atuando mais quando a velocidade de rolamento está mais lenta, podendo interferir assim nos valores encontrados.

5.5. COEFICIENTE DE ATRITO DE DESLIZAMENTO

O primeiro método utilizado para medir esse coeficiente foi o plano inclinado, sendo calculado o seu valor a partir da Equação 31.

Inicialmente foram construídos aglomerados de 3, 4 e 5 partículas, porém, com os resultados preliminares dos ângulos de deslizamento obtidos de todas as partículas, viu-se a necessidade de realizar os testes para aglomerados de 6 e 7 partículas de cada tipo. Isso porque constatou-se uma tendência de estabilização do ângulo de deslizamento dos aglomerados mesmo com o aumento de partículas, como pode ser observado nas Tabelas 19 e 20 e nas Figuras 62 e 63.

Nos testes realizados, foram analisados apenas aglomerados em que todas as partículas estivessem em contato com a superfície e apenas nos formatos mostrados na Figura 26. Não foram consideradas condições em que partículas se aglomerariam sobre outras partículas, aumentando ainda mais a massa do aglomerado.

Pode-se observar que o aumento de peso de aglomerado não influencia no ângulo de deslizamento e, conseqüentemente, no coeficiente de atrito estático para a maior parte dos dados obtidos, (Tabelas 19 e 20), sendo exceção apenas do aumento de 3 para 4 partículas.

Tabela 19 – Média dos ângulos obtidos para atrito estático ($[\theta] \pm \sigma$) dos aglomerados sobre superfície acrílica.

Partículas	Quantidade de partículas por aglomerado					
	3	4	5	6	7	7 "flor"
ABS sem revestimento	31,3±2,5	31,3±2,8	31,9±2,6	30,5±2,4	31,7±4,0	30,0±3,3
ABS com 1 camada de revestimento	33,7±1,0	44,4±4,0	43,4±2,8	45,9±1,9	46,5±2,0	46,5±1,9
ABS com 2 camadas de revestimento	33,3±0,8	52,3±5,6	52,2±3,8	50,1±2,1	49,1±1,9	47,9±2,5
Fluorelastômero	34,4±1,0	48,2±2,4	48,0±3,1	48,9±2,8	48,6±2,8	48,9±3,2
Nitrila	35,4±2,3	47,2±2,3	52,8±2,9	51,5±3,2	49,5±3,0	49,6±3,3
Alumina	31,4±1,8	30,7±2,2	32,6±2,5	31,3±2,2	29,8±2,7	31,5±3,0
Porcelana	27,4±2,4	29,2±3,2	28,4±2,0	27,1±3,0	28,2±2,5	28,4±2,3

Fonte: Elaborada pela autora.

A não influência da massa sobre o coeficiente também é comprovada com a Equação 31, onde não se aparece qualquer tipo de termo que relacione massa de partícula. Essa equação somente relaciona o ângulo com o coeficiente de atrito. A massa do aglomerado aparece na Equação 29, onde o coeficiente deveria ser inversamente proporcional à massa. No entanto, ao aumentar a massa, também se aumenta a força F , que aparece no numerador da equação, portanto, aparentemente, um compensaria o outro.

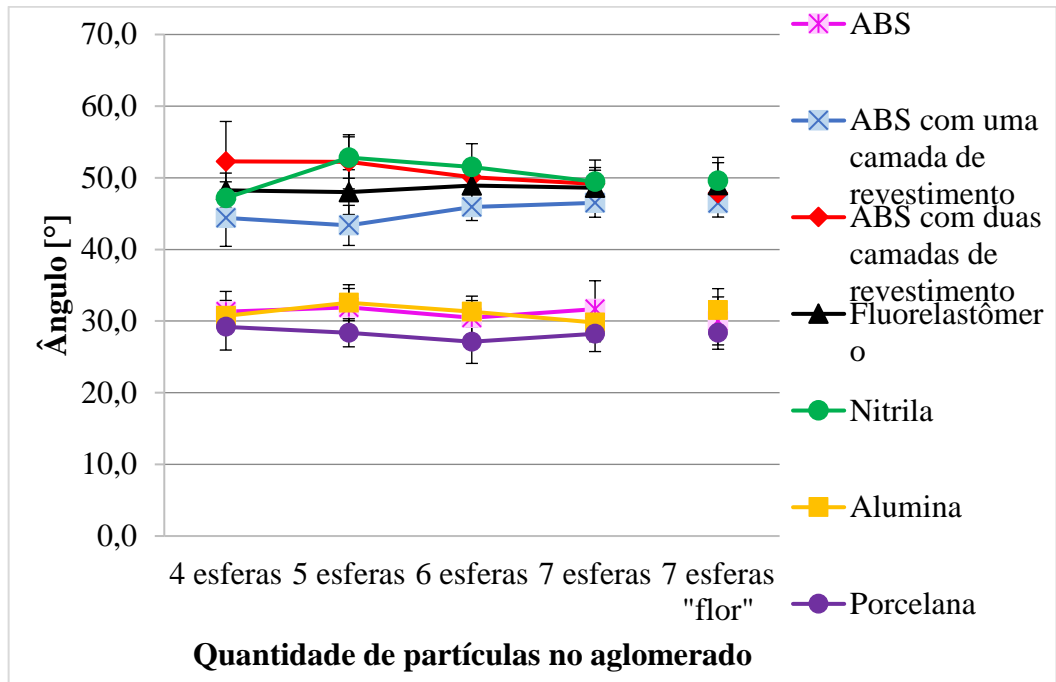
Tabela 20 – Média dos ângulos obtidos para atrito estático ($[\text{°}] \pm \sigma$) dos aglomerados sobre superfície vítrea.

Partículas	Quantidade de partículas por aglomerado					
	3	4	5	6	7	7 "flor"
ABS sem revestimento	28,4±2,8	30,1±2,8	30,9±2,8	29,3±3,7	28,7±2,2	29,4±2,2
ABS com 1 camada de revestimento	32,7±1,0	39,5±1,5	40,0±2,1	41,4±2,6	41,2±2,3	41,4±2,8
ABS com 2 camadas de revestimento	34,4±1,3	45,4±2,5	44,1±2,2	44,7±1,9	44,6±2,0	44,1±2,1
Fluorelastômero	36,4±1,5	43,0±2,2	42,1±2,4	42,5±2,1	42,9±2,9	45,8±3,0
Nitrila	36,3±1,4	45,1±2,4	45,3±1,8	45,9±2,0	46,0±2,3	46,9±2,7
Alumina	28,8±5,3	31,5±3,0	32,8±3,3	30,9±3,0	30,3±2,2	32,0±2,9
Porcelana	27,2±3,3	29,8±3,2	27,0±3,2	28,7±2,8	29,6±2,8	28,0±2,5

Fonte: Elaborada pela autora.

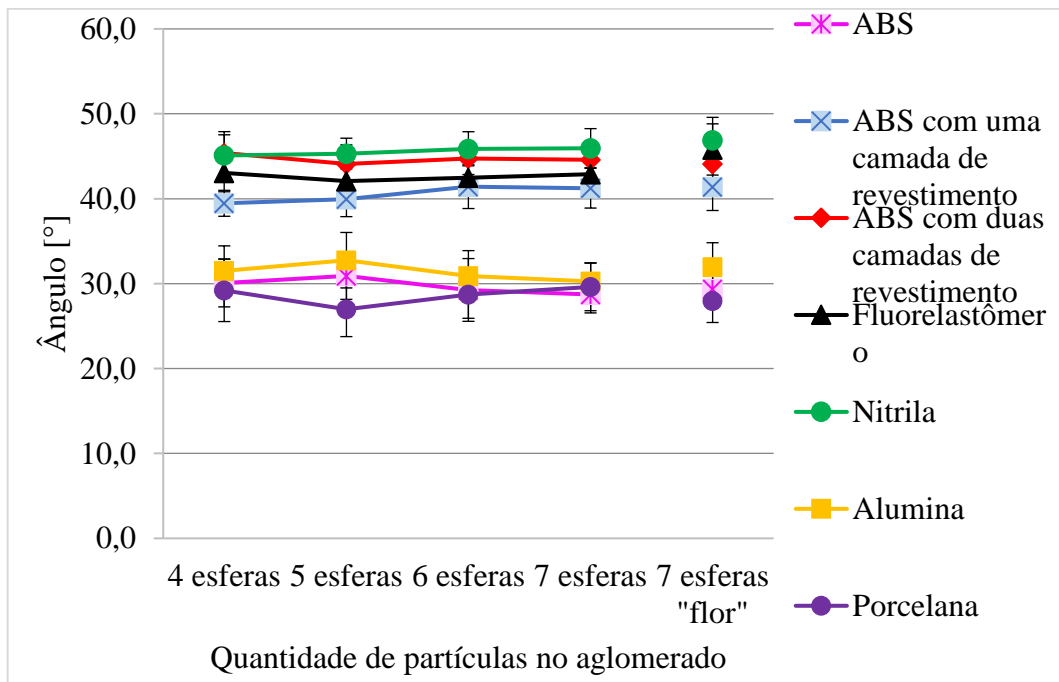
Os coeficientes de atrito estático das partículas com a superfície de vidro ($\mu_{p_{pw_V}}$) são, em geral, menores do que os obtidos para a de acrílico ($\mu_{p_{pw_A}}$), o que se deve à menor rugosidade aparente do vidro em relação ao acrílico.

Figura 62 – Médias dos ângulos de deslizamento de partículas sobre superfície acrílica.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 63 – Médias dos ângulos de deslizamento de partículas sobre superfície vítrea.



Fonte: Elaborada pela autora.

Já observando as Figuras 62 e 63, uma tendência de estabilização com relação ao ângulo de deslizamento- pôde ser percebida. De acordo com a teoria de Coulomb, esse parâmetro pode ser determinado como a relação entre as forças tangencial e normal que agem sobre um corpo em contato com uma superfície. Essa teoria assume que a força de contato é proporcional à força normal, o que faz com que o coeficiente de atrito estático seja constante para um determinado par de materiais em contato sujeitos a condições similares (Greenwood e Williamson, 1966).

Inicialmente, acredita-se que a teoria seria falha para pequenas áreas de contato (aglomerados de 3 partículas), para as quais a relação entre as forças normal e friccional não é exatamente linear, fazendo com que o coeficiente de atrito estático não seja inteiramente independente da área de contato da amostra com a superfície (Bhushan e Kulkarni, 1996). No entanto, para os aglomerados com 3 partículas, como a massa era pequena, houve tendência de rotação vertical (como demonstrado na Figura 64), o que elimina a possibilidade de falha, já que o aglomerado passa a não ter mais contato com a superfície.

Figura 64 – Rotação do aglomerado de 3 partículas.



Fonte:Elaborado pela autora.

Partículas com superfícies mais irregulares tendem a ter maior atrito com as placas esperar que partículas de nitrila e fluorelastômero obtivessem maiores valores de $\mu_{s_{pw}}$, já que possuem maiores valores de rugosidade aparente. No entanto, os valores mais elevados

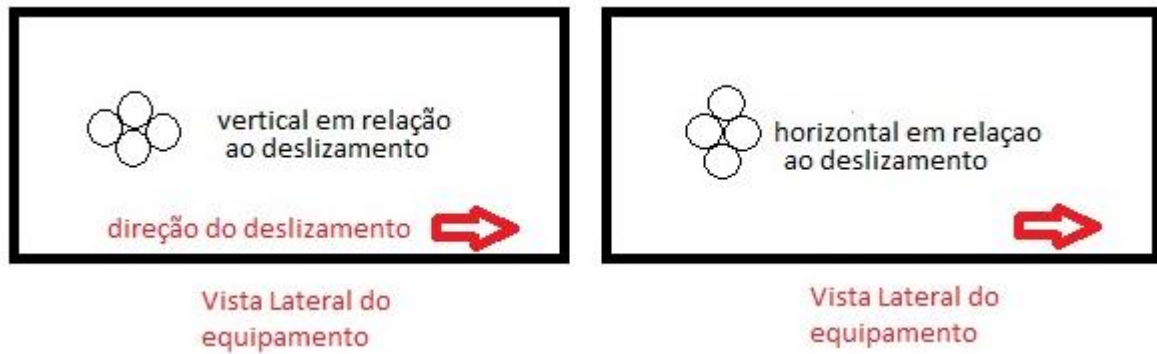
correspondem às partículas de nitrila e ABS com 2 camadas de revestimento, como visto nas Figuras 33 e 34. Para as partículas de ABS sem revestimento, o deslizamento ocorreu mais facilmente devido à menor interação partícula-superfície.

Sobre o fluorelastômero, pôde-se perceber que esse foi o único tipo de partícula que sofreu leve interferência do formato da montagem de aglomerados com 7 partículas (Figuras 62 e 63), especialmente se tratando dos resultados obtidos na placa de vidro. Acredita-se isso se deveu ao posicionamento das esferas, que, mesmo colocando a partícula marcada dos aglomerados sobre o ponto escolhido na placa, os atritos dos dois aglomerados (normal e “flor”) com as superfícies são diferentes. No entanto, ao observar os valores encontrados nas Tabelas 19 e 20, pode-se constatar que a diferença está dentro dos desvios.

A princípio, um importante fator observado foi a questão das partículas de fluorelastômero terem ampla faixa de resultados para o ângulo obtido no deslizamento, o que elevava o desvio padrão da medida. Isso se deve ao tipo de rugosidade da partícula. Na Figura 35 pode-se ver que existem ranhuras preferenciais que são as responsáveis pelo atrito com as placas e que dificultaram a reprodutibilidade dos experimentos. Por isso foi necessário maior atenção no posicionamento de todos os aglomerados sempre no mesmo lugar, a fim de garantir que o atrito entre as superfícies fosse semelhante em todas as análises.

Ainda foi possível analisar a mudança de posicionamento dos aglomerados. Na maioria dos casos, os aglomerados foram soltos em direção vertical (Figura 65). Porém alguns testes foram realizados com os aglomerados em posição horizontal na placa (casos de aglomerados com 4, 5, 6 e 7 partículas), não se observando variação dos ângulos obtidos para ABS (sem e com revestimento) e nitrila. Já para partículas de fluorelastômero, houve mudança de ângulo, que contribuiriam para desvios padrões mais altos. Além disso, para todos os testes realizados de qualquer tipo de partícula posicionada em posição horizontal, os aglomerados deslizaram giraram com todas as partículas em contato com a superfície.

Figura 65 – Direção das partículas no deslizamento.



Fonte: Elaborada pela autora.

Outro detalhe importante a ser ressaltado se trata do deslizamento das partículas de material de borracha, as quais deslizam extremamente devagar, muitas vezes se estabilizando em outra posição antes de deslizar totalmente pela superfície. Os únicos aglomerados de partículas que deslizaram com facilidade sobre os planos foram as de ABS sem revestimento. No caso das partículas de borracha, foi considerada a medição do ângulo a partir do momento que as partículas obtiveram a primeira parte considerável do deslizamento, já que elas deslizavam aos poucos. Mais uma vez, pôde-se observar que a força de adesão entre as partículas e a superfície precisa ser mais bem estudada.

Como a Equação 31 não relaciona a massa dos aglomerados, é possível dizer que quanto maior o ângulo obtido para o deslizamento, maior o coeficiente de atrito. Assim, como há a tendência de estabilização de ângulo, para o coeficiente não é diferente (Tabelas 21 e 22), sendo visto nas Figuras 66 e 67.

Tabela 21 – Coeficientes de atrito estático dos aglomerados sobre superfície acrílica.

Partículas	Quantidade de partículas por aglomerado					
	3	4	5	6	7	7 "flor"
ABS sem revestimento	0,6085	0,6105	0,6246	0,5897	0,6211	0,5805
	±	±	±	±	±	±
	0,0624	0,0682	0,0637	0,0563	0,0973	0,0801
ABS com 1 camada de revestimento	0,6665	0,9887	0,9486	1,0352	1,0566	1,0551
	±	±	±	±	±	±
	0,0267	0,1417	0,0964	0,0688	0,0740	0,0720
ABS com 2 camadas de revestimento	0,6562	1,3370	1,3060	1,1981	1,1588	1,1095
	±	±	±	±	±	±
	0,0208	0,3449	0,1866	0,0865	0,0802	0,0932
Fluorelastômero	0,6842	1,1241	1,1179	1,1528	1,1406	1,1562
	±	±	±	±	±	±
	0,0263	0,0969	0,1220	0,1197	0,1173	0,1305
Nitrila	0,7117	1,0825	1,3283	1,2692	1,1762	1,1824
	±	±	±	±	±	±
	0,0600	0,0829	0,1481	0,1522	0,1210	0,1258
Alumina	0,6116	0,5653	0,6404	0,6098	0,5743	0,6161
	±	±	±	±	±	±
	0,0441	0,0515	0,0627	0,0513	0,0639	0,0725
Porcelana	0,5203	0,5611	0,5407	0,5141	0,5380	0,5412
	±	±	±	±	±	±
	0,0525	0,0763	0,0441	0,0683	0,0553	0,0529

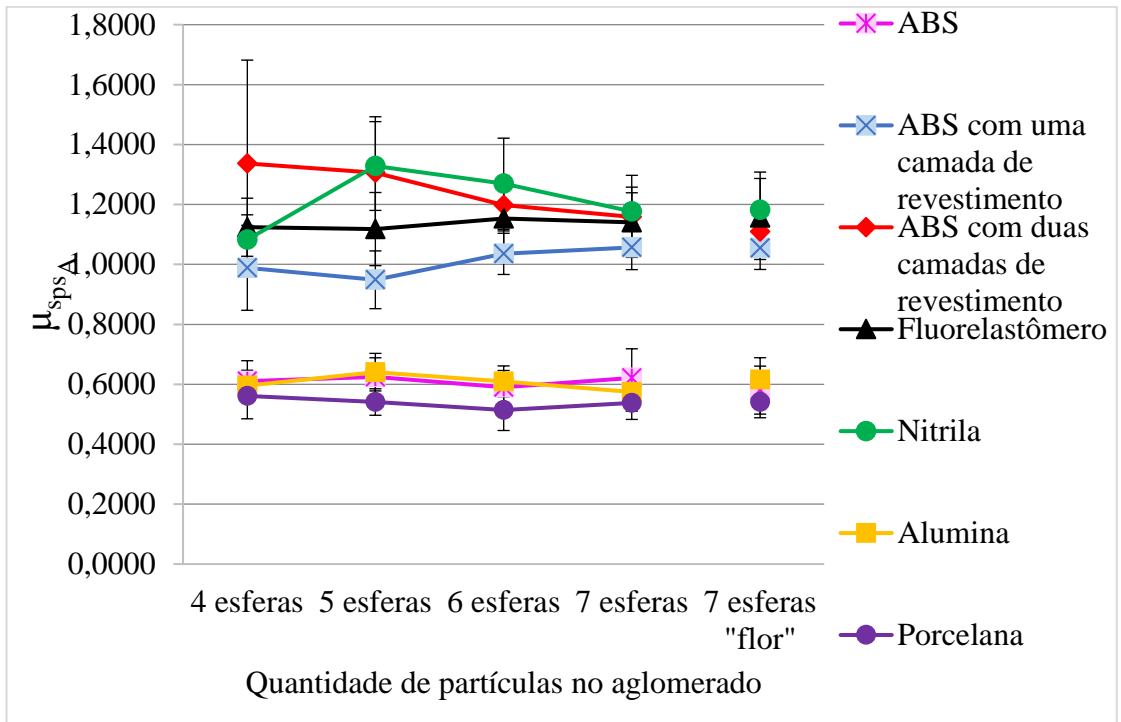
Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 22 – Coeficientes de atrito estático dos aglomerados sobre superfície vítrea.

Partículas	Quantidade de partículas por aglomerado					
	3	4	5	6	7	7 "flor"
ABS sem revestimento	0,5426	0,5809	0,6007	0,5633	0,5490	0,5636
	±	±	±	±	±	±
	0,0624	0,0660	0,0665	0,0860	0,0497	0,0509
ABS com 1 camada de revestimento	0,6424	0,8242	0,8396	0,8855	0,8794	0,8850
	±	±	±	±	±	±
	0,0254	0,0449	0,0619	0,0836	0,0737	0,0889
ABS com 2 camadas de revestimento	0,6840	1,0175	0,9720	0,9930	0,9876	0,9712
	±	±	±	±	±	±
	0,0335	0,0902	0,0776	0,0648	0,0688	0,0709
Fluorelastômero	0,7375	0,9367	0,9058	0,9177	0,9331	1,0341
	±	±	±	±	±	±
	0,0412	0,0747	0,0779	0,0697	0,0933	0,1080
Nitrila	0,7346	1,0070	1,0132	1,0340	1,0371	1,0731
	±	±	±	±	±	±
	0,0368	0,0870	0,0650	0,0759	0,0827	0,1069
Alumina	0,5552	0,6147	0,6463	0,6005	0,5846	0,6262
	±	±	±	±	±	±
	0,1192	0,0707	0,0812	0,0701	0,0521	0,0693
Porcelana	0,5148	0,5757	0,5111	0,5497	0,5702	0,5319
	±	±	±	±	±	±
	0,0717	0,0745	0,0716	0,0630	0,0654	0,0562

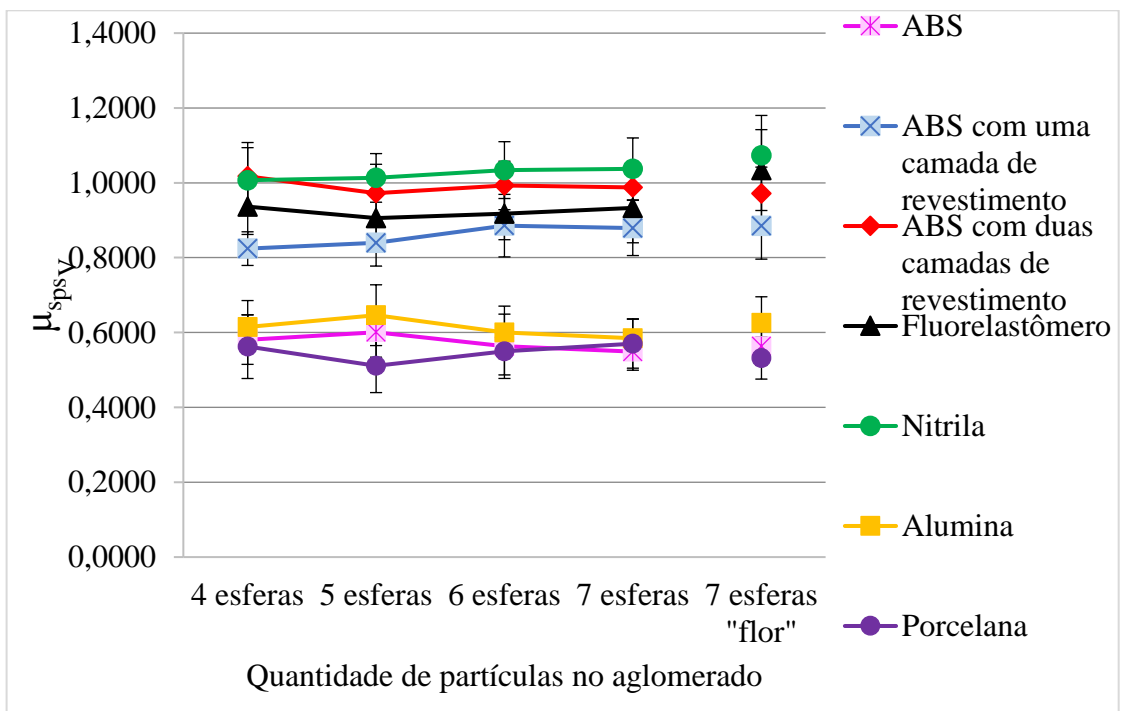
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 66 – Coeficiente de atrito estático partícula-superfície acrílica.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 67 – Coeficiente de atrito estático partícula-superfície vítrea.



Fonte: Elaborada pela autora.

O coeficiente de atrito de deslizamento ainda foi analisado utilizando superfície feita com as próprias partículas, ou seja, analisa-se o coeficiente de atrito de deslizamento do tipo partícula-partícula ($\mu_{s,pp}$). As Tabelas 23 e 24 apresentam os valores dos ângulos obtidos para o deslizamento e dos coeficientes de atrito de deslizamento obtidos medido com a Equação 31, respectivamente.

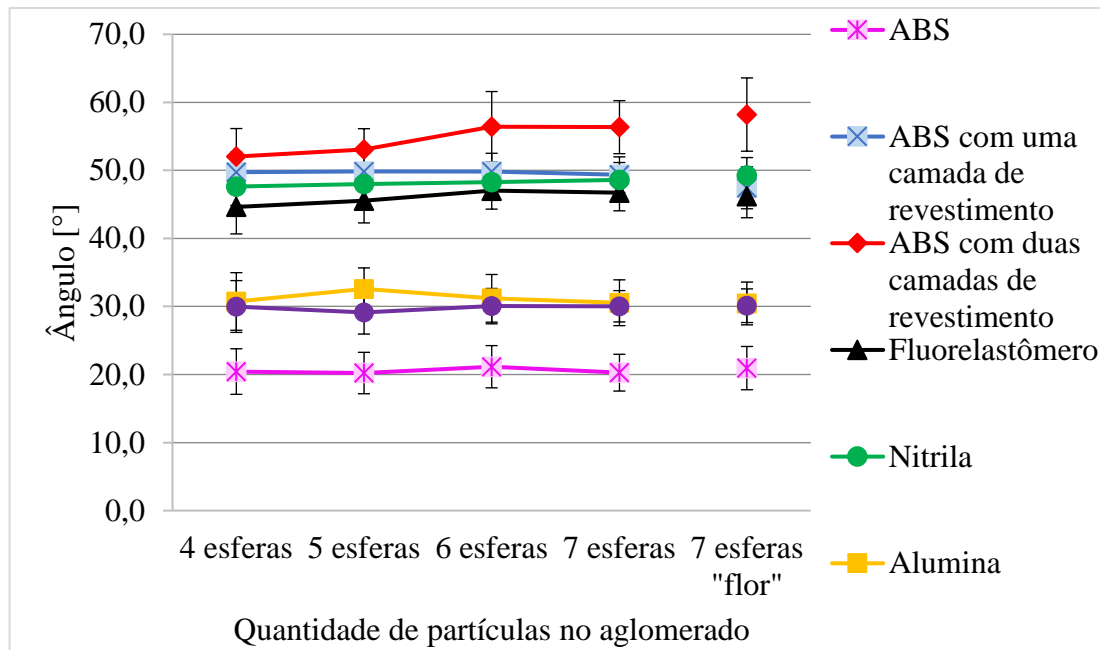
Vale lembrar que todas as partículas dos aglomerados estavam em contato com outras partículas antes de deslizarem, porém sem que elas encaixassem, ou seja, não foi analisada a condição de aderência de partículas a outras.

Tabela 23 – Média dos ângulos obtidos para atrito estático dos aglomerados sobre superfície de partícula.

Partículas	Quantidade de partículas por aglomerado					
	3	4	5	6	7	7 "flor"
ABS sem revestimento	16,8±2,7	20,4±3,3	20,2±3,0	21,1±3,1	20,3±2,7	20,9±3,2
ABS com 1 camada de revestimento	38,1±3,8	49,7±3,0	49,9±2,7	49,8±2,7	49,4±2,6	47,4±3,1
ABS com 2 camadas de revestimento	38,9±3,3	52,0±4,1	53,1±3,1	56,4±5,2	56,4±3,9	58,2±5,4
Fluorelastômero	36,2±4,0	44,6±4,0	45,6±3,3	47,0±2,7	46,7±2,7	46,2±3,2
Nitrila	38,5±2,3	47,6±2,8	48,0±2,5	48,3±2,4	48,6±2,6	49,3±2,6
Alumina	31,5±3,2	30,7±4,2	32,6±3,1	31,2±3,5	30,5±3,4	30,4±3,1
Porcelana	30,0±3,4	30,0±3,8	29,1±3,2	30,1±2,6	30,0±2,3	30,1±2,5

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 68 – Médias dos ângulos de deslizamento de partículas sobre superfície de partículas.



Fonte: Elaborada pela autora.

Com relação ao coeficiente, pode-se observar na Tabela 24 que as partículas de ABS com revestimento apresentaram valores acima de 1. No entanto, pode-se ver pela Figura 69 que essas partículas também são as que obtiveram os maiores desvios padrões, indicando que há uma grande incerteza no valor obtido.

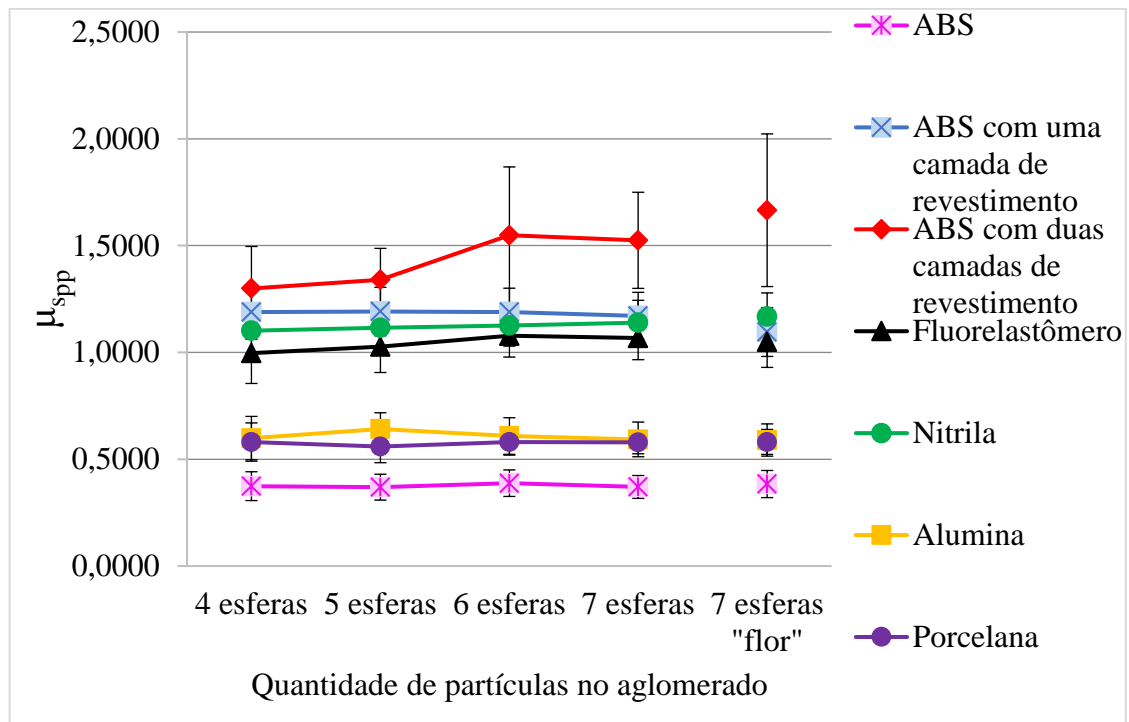
Considerando as rugosidades obtidas das partículas, os resultados mostraram que quanto maior a rugosidade, maior é o coeficiente de atrito de deslizamento. Com exceção das partículas de ABS com revestimento, a Figura 69 apresentou exatamente essa tendência, confirmando a teoria.

Tabela 24 – Coeficiente de atrito de deslizamento (μ_{spp} [$\pm \sigma$]) partícula-partícula.

Partículas	Quantidade de partículas por aglomerado					
	3	4	5	6	7	7 "flor"
ABS sem revesti- mento	0,3021 \pm 0,0512	0,3741 \pm 0,0675	0,3694 \pm 0,0605	0,3880 \pm 0,0620	0,3704 \pm 0,0535	0,3840 \pm 0,0635
ABS com 1 camada de revestimento	0,7899 \pm 0,1077	1,1883 \pm 0,1270	1,1915 \pm 0,1135	1,1897 \pm 0,1112	1,1711 \pm 0,1103	1,0957 \pm 0,1143
ABS com 2 camadas de revestimento	0,8127 \pm 0,0974	1,2993 \pm 0,1968	1,3400 \pm 0,1472	1,5486 \pm 0,3197	1,5249 \pm 0,2250	1,6657 \pm 0,3572
Fluorelastômero	0,7359 \pm 0,1073	0,9968 \pm 0,1420	1,0268 \pm 0,1206	1,0784 \pm 0,0999	1,0670 \pm 0,1009	1,0503 \pm 0,1203
Nitrila	0,7963 \pm 0,0658	1,1019 \pm 0,1079	1,1151 \pm 0,1010	1,1262 \pm 0,0964	1,1397 \pm 0,1043	1,1675 \pm 0,1110
Alumina	0,6155 \pm 0,0786	0,5990 \pm 0,1016	0,6417 \pm 0,0759	0,6099 \pm 0,0856	0,5930 \pm 0,0812	0,5901 \pm 0,0753
Porcelana	0,5793 \pm 0,0819	0,5806 \pm 0,0894	0,5595 \pm 0,0756	0,5801 \pm 0,0605	0,5792 \pm 0,0537	0,5813 \pm 0,0584

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 69 – Coeficiente de atrito estático partícula-partícula.



Fonte: Elaborada pela autora.

Outra maneira de analisar o coeficiente de atrito de deslizamento foi utilizando os valores obtidos para o coeficiente de atrito de rolamento do método lançamento oblíquo. Foram utilizados os dados obtidos no comprimento de 0,2m.

A Equação 27 explicita que caso haja conservação da energia mecânica a velocidade de rolamento depende linearmente da raiz quadrada da altura do plano inclinado. Esse comportamento da velocidade indica que se pode fazer uma tabela em função da raiz quadrada da altura para os três modos de se determinar a velocidade final da partícula no trilho. Foi medida a altura h de cada ângulo de inclinação e as velocidades utilizadas foram as obtidas no coeficiente de atrito de rolamento.

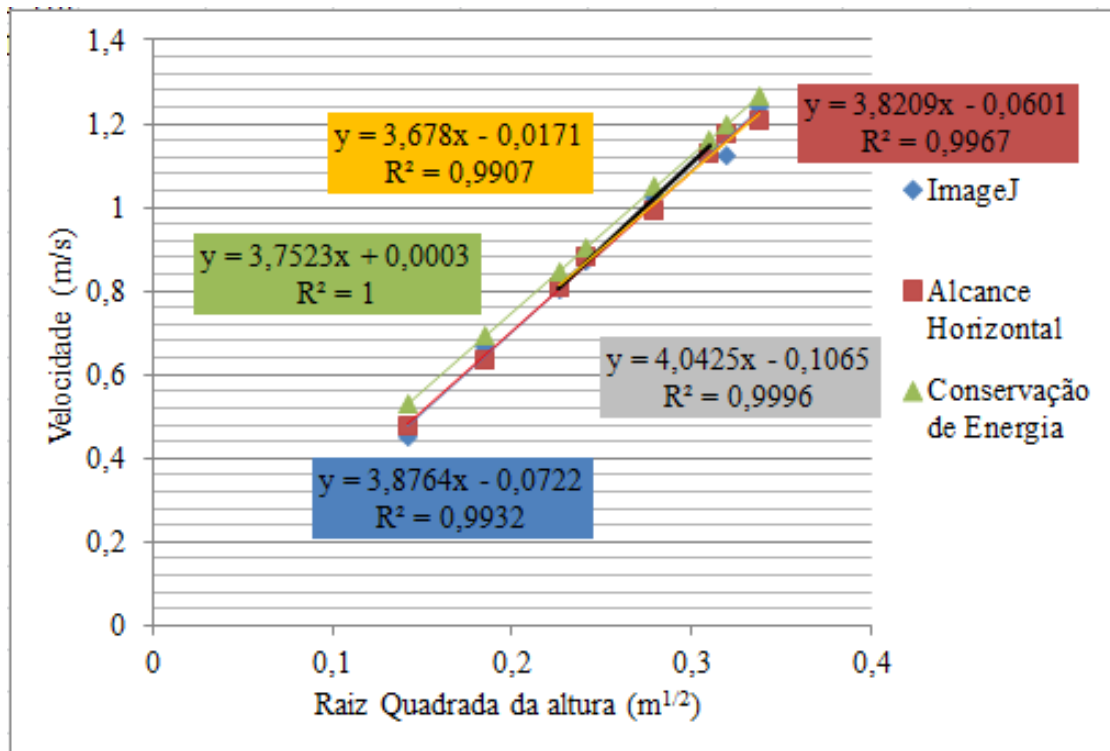
Uma maneira simples de analisar esses dados é obter o gráfico das velocidades em função da raiz quadrada da altura e verificar o trecho em que os dados se aproximam de uma reta, tal como é feito na Figura 70 para as partículas de ABS sem revestimento.

A análise consiste em eliminar os dados obtidos em 5 e 10°, já que nestes são considerados que há uma má distribuição de força sobre a partícula, e verificar os pontos em que uma reta de tendência linear é aplicada por Método dos Mínimos Quadrados. É considerado

que o ponto que se desvia mais da linha de tendência representa a altura, e conseqüentemente o ângulo, em que começa o deslizamento das partículas. O anexo 1 contém esses resultados.

A linha preta do gráfico (com a reta de tendência descrita na fórmula em cor cinza) representa a tendência linear para os dados obtidos de velocidade pelo método de análise de imagens em ImageJ. Caso ela seja prolongada, é possível verificar que o próximo ponto já não passaria por ela, indicando que nessa altura a partícula passa a deslizar. Já a linha laranja do gráfico (com a reta de tendência descrita na fórmula em cor laranja) mostra a tendência linear para os dados obtidos de velocidade pelo método do alcance horizontal.

Figura 70 – Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos para partículas de ABS sem revestimento em acrílico.



Fonte: Elaborada pela autora.

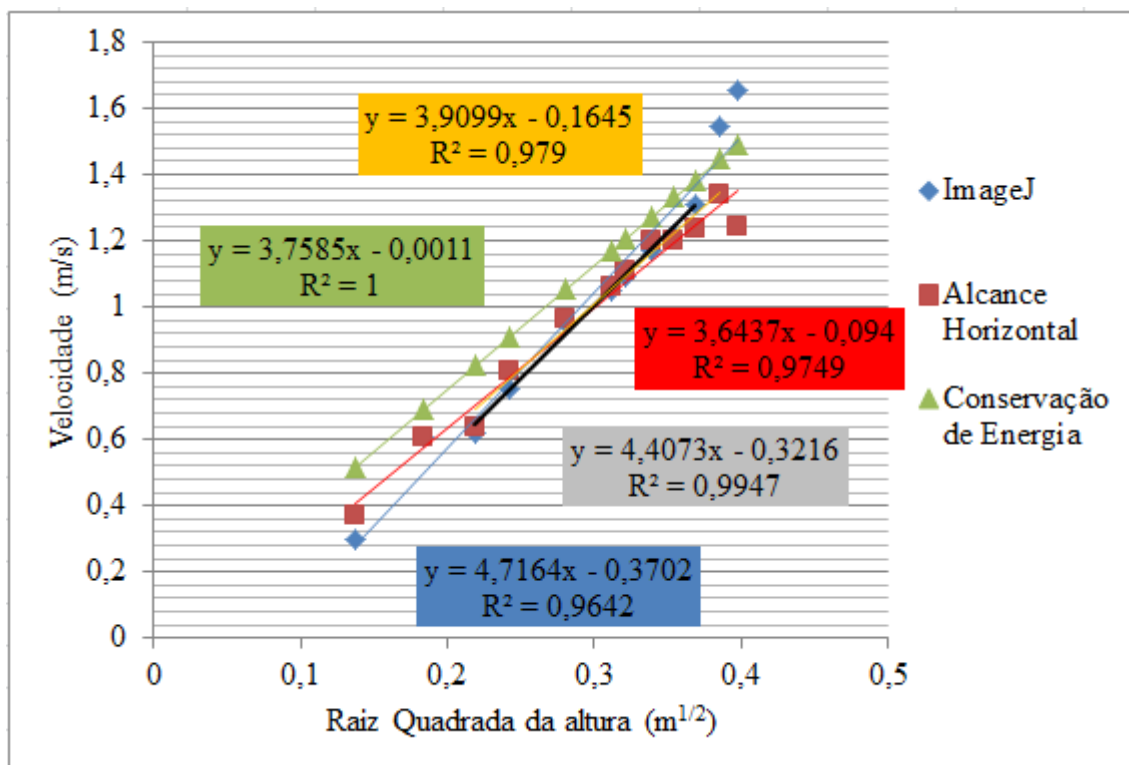
Um detalhe importante a se observar é que R^2 obtido na equação linear é muito próximo de 1, indicando que os dados obtidos foram satisfatórios. Sendo assim, qualquer um dos métodos do ImageJ ou alcance horizontal pode ser considerado confiável, já que seus R^2 deram muito próximo de 1.

Sendo assim, para qualquer um dos dois métodos, é possível dizer que o ângulo em que a partícula começa a deslizar está entre 29 e 31° ($0,55 < \mu_s < 0,60$). No método de plano inclinado foi obtido o ângulo de 31° para o deslizamento (Tabela 19), portanto é possível que o

coeficiente de atrito de deslizamento para as partículas lisas é próximo de $\mu_s = 0,60$, segundo a Equação 31.

A mesma análise foi feita para as outras partículas também. Os dados obtidos para a análise do coeficiente de atrito de deslizamento pelo método de Goya (2004) para as partículas de ABS com uma camada de revestimento são mostrados na Figura 71. No anexo 2 são apresentados os valores da metodologia para as partículas de ABS com uma camada de revestimento.

Figura 71 – Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos para partículas de ABS com uma camada de revestimento em acrílico.



Fonte: Elaborada pela autora.

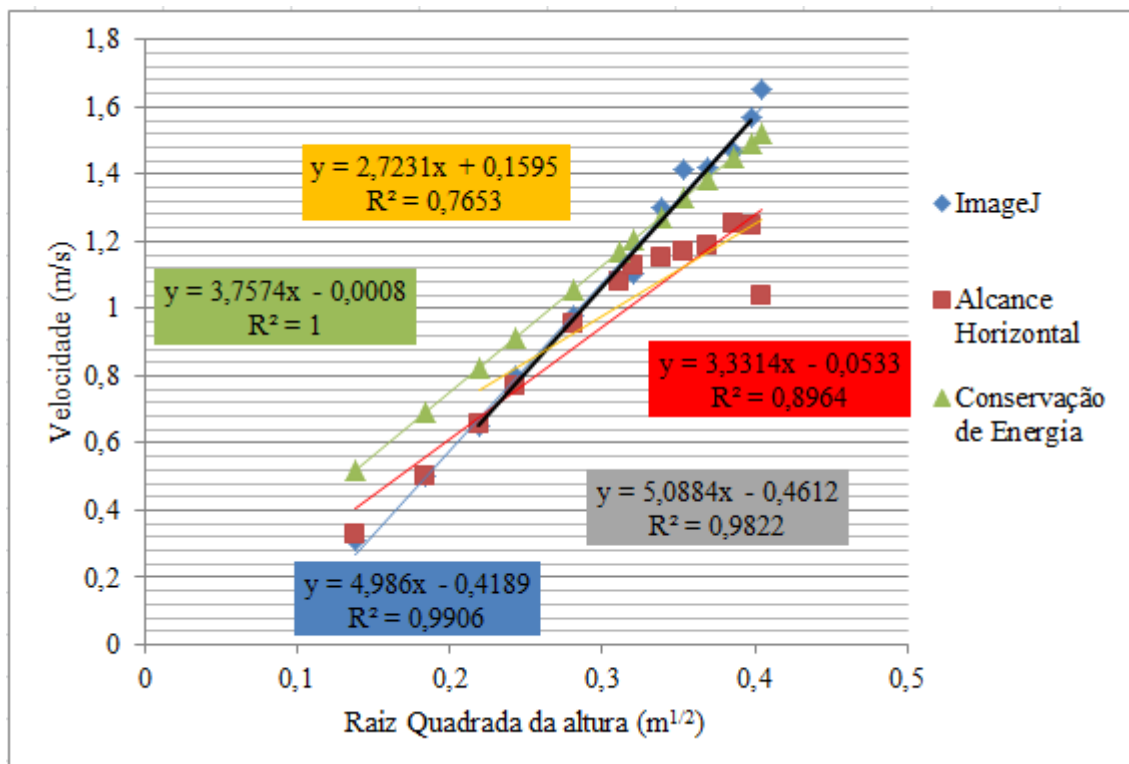
Verifica-se que mesmo obtendo os resultados para o coeficiente de atrito de rolamento dessas partículas de circularidade inferior, o resultado para o coeficiente de atrito de deslizamento tipo partícula-superfície acrílica da metodologia de análise pelo ImageJ deve estar entre os ângulos 43 e 48°, já que o primeiro ponto o qual se distanciou da reta foi exatamente no ângulo de 48° no método de análise do ImageJ. Porém, observa-se que caso fossem utilizados os resultados do alcance horizontal, a análise seria um pouco mais complicada de ser feita, já que os pontos da Figura 68 não estão totalmente alinhados à linha de tendência linear.

Sendo assim, o coeficiente de atrito de deslizamento das partículas de ABS com uma camada sobre superfície acrílica deve estar entre $0,93 < \mu_s < 1,11$.

O anexo 3 apresenta os resultados obtidos para as partículas de ABS com duas camadas de revestimento. Na Figura 72 é possível verificar que alguns pontos da velocidade obtidas com o ImageJ estão se afastando da reta, por isso, não é possível dizer exatamente qual é o ângulo no qual começa o deslizamento, estando provavelmente entre os ângulo de 39 a 55°. Sendo assim, o coeficiente de atrito de deslizamento das partículas de ABS com duas camadas sobre superfície acrílica deve estar entre $0,81 < \mu_s < 1,43$.

Com relação os resultados do alcance horizontal, observa-se o mesmo que para as partículas de uma camada de revestimento, em que caso fossem os dados utilizados, a análise seria um pouco mais complicada de ser feita, já que os pontos da Figura 72, também não estão totalmente alinhados à linha de tendência linear.

Figura 72 – Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos para partículas de ABS com duas camadas de revestimento em acrílico.



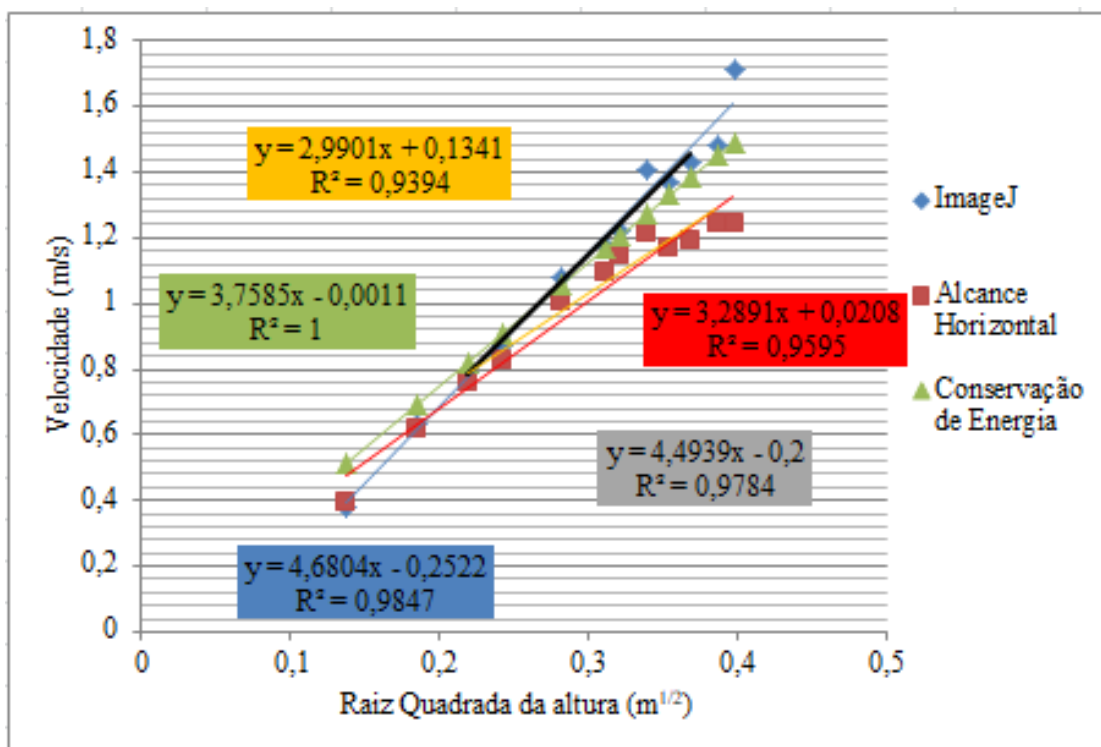
Fonte: Elaborada pela autora.

As partículas de fluorelastômero também apresentaram grande desvio, sendo isso verificado pelo R^2 da linha de tendência linear do método dos mínimos quadrados (Figura 73)

para ImageJ e alcance horizontal. No entanto, é possível dizer que o ângulo 52° foi o que mais de afastou da reta quando se analisa os dados obtidos do ImageJ, logo $\mu_s = 1,28$. Por isso, é bem provável que esse seja o ângulo o qual a partícula começou a deslizar, se aproximando do ângulo obtido no método do plano do inclinado (Tabela 19) que foi próximo de 49° .

Já para o alcance horizontal, os pontos estão muito distanciados da reta, portanto, não é possível verificar qual o ângulo que a partícula começa a deslizar na superfície acrílica.

Figura 73 – Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos para partículas de fluorelastômero em acrílico.

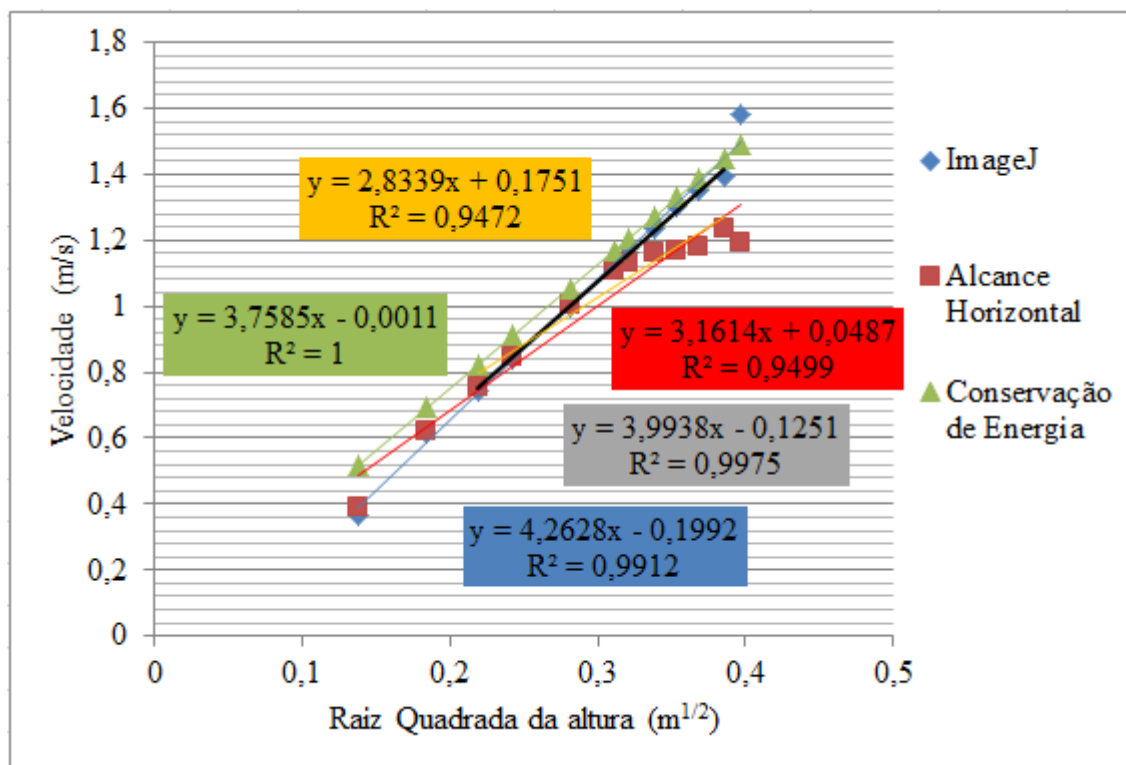


Fonte: Elaborada pela autora.

Outro detalhe observado na Figura 73 é que, para essa partícula, os resultados de velocidade retirados pelo ImageJ estão acima dos dados obtidos caso aconteça a conservação de energia no rolamento (ou seja, toda energia potencial da partícula seja transformada em cinética sem dissipação por conta do rolamento). No entanto, isso não impediria de encontrar o resultado do coeficiente de atrito de deslizamento caso os dados se aproximassem da reta. O mesmo vale para a Figura 72 dos dados do ABS com duas camadas de revestimento.

Já as partículas de nitrila, dentre as partículas rugosas, foram as que mais apresentaram resultados satisfatórios, sendo que apenas um ângulo passou a desviar da reta linear, sendo este o ângulo de 52° (Figura 74) na análise das velocidades obtidas pelo ImageJ. No entanto, é possível observar que o ângulo de 48° começou a apresentar resultado fora do esperado, logo a partir deste ângulo é considerado que passa a haver deslizamento ao invés de rolamento, assim, o coeficiente de deslizamento para a partícula de nitrila em acrílico é: $\mu_s = 1,11$; sendo muito próximo ao obtido pelo deslizamento em plano inclinado (Tabela 19). Já para as análises de alcance horizontal, apesar dos pontos estarem afastados da reta de tendência, acredita-se que o ponto que mais se distanciou foi entre os ângulos de 43 e 48° , logo $0,93 < \mu_s < 1,11$.

Figura 74 - Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos para partículas de nitrila em acrílico.

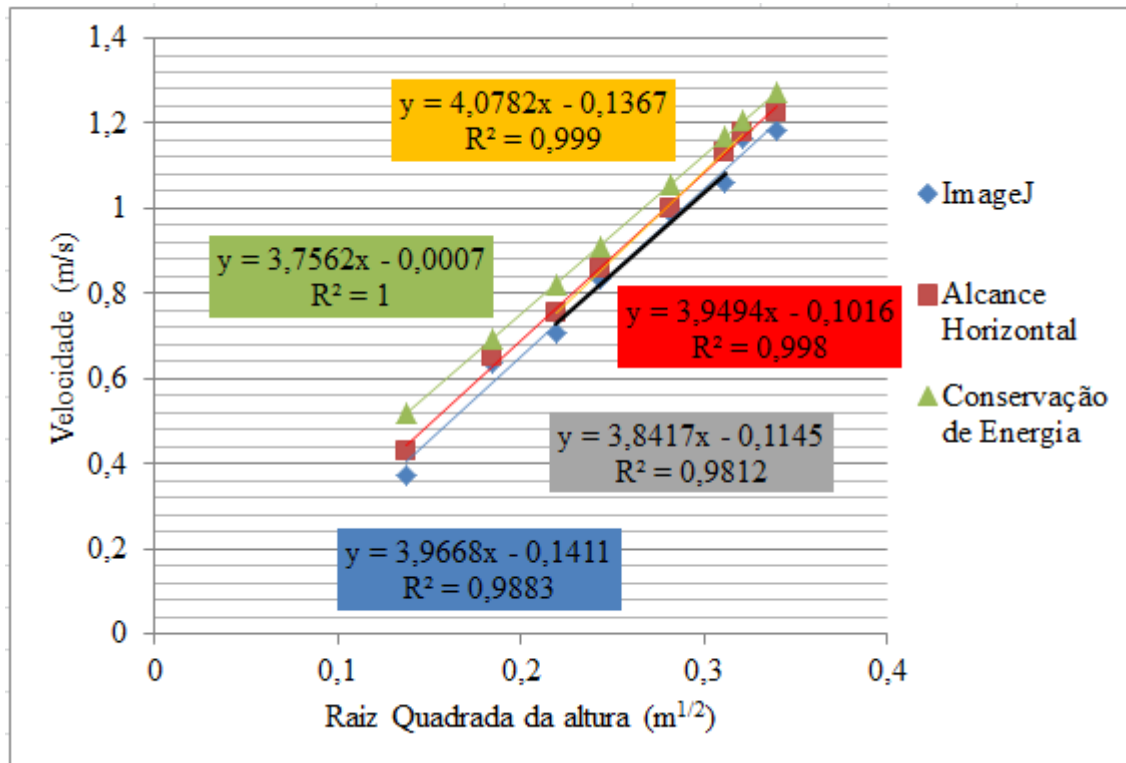


Fonte: Elaborada pela autora.

As partículas de alumina também participaram dessa análise, e mesmo apresentando deslizamento mais rápido que as outras partículas rugosas, é possível verificar pela Figura 75 que esse ocorreu a partir do ângulo de 28° para a análise do ImageJ. Por isso, o coeficiente de atrito de deslizamento para partícula de alumina em superfície acrílica é: $\mu_s = 0,53$. Já para

os dados retirados no alcance horizontal, não é possível definir o ângulo de deslizamento, visto que quase todos os pontos estão distanciados da reta de tendência laranja.

Figura 75 – Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos para partículas de alumina em acrílico.

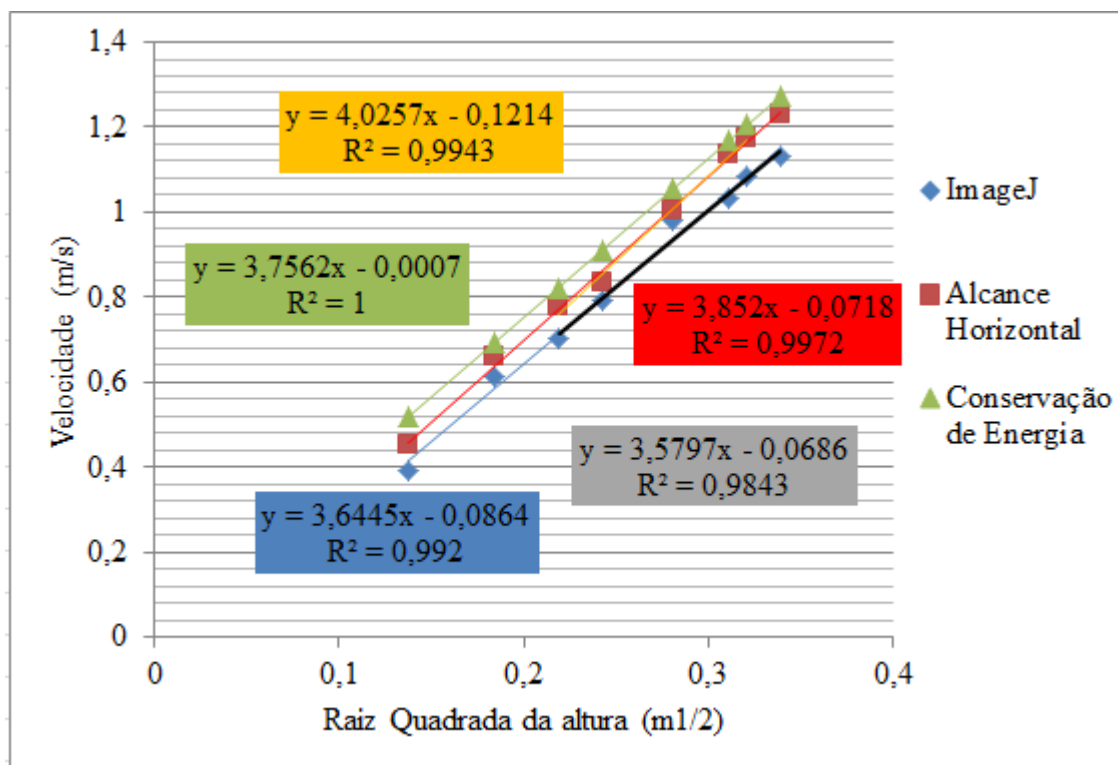


Fonte: Elaborada pela autora.

Por último, as partículas rugosas de porcelana também não apresentaram resultado muito dentro do esperado, já que é possível verificar na Figura 76 que todos os pontos de velocidade do ImageJ estão dentro de suas retas de tendências lineares, logo é impossível saber qual ângulo exatamente começa o deslizamento dessas partículas.

Já para os dados de velocidade retirados pelo alcance horizontal, é possível verificar que 17° foi o se distanciou da reta de tendência linear, o que gera um coeficiente de $\mu_s = 0,31$. No entanto, quando comparado esse valor encontrado com o coeficiente obtido pelo método do plano inclinado, é possível ver que ele está muito abaixo, sendo o resultado da Tabela 19 próximo de 28° , gerando um coeficiente de atrito de deslizamento na superfície acrílica de $\mu_s = 0,53$.

Figura 76 – Velocidade em função da raiz quadrada da altura para os três modos para partículas de porcelana em acrílico.



Fonte: Elaborada pela autora.

A Tabela 25 mostra o comparativo entre os métodos para encontrar os valores do coeficiente de atrito de deslizamento das partículas sobre a superfície acrílica.

Tabela 25 – Comparativo entre os métodos para os valores encontrados do coeficiente de atrito de deslizamento em superfície acrílica.

Partícula	Método		
	Plano Inclinado	ImageJ	Alcance Horizontal
ABS sem revestimento	$\mu_s \approx 0,60$	$0,55 < \mu_s < 0,60$	$0,55 < \mu_s < 0,60$
ABS com 1 camada de revestimento	$0,97 < \mu_s < 1,05$	$0,93 < \mu_s < 1,11$	Não é possível analisar
ABS com 2 camadas de revestimento	$1,11 < \mu_s < 1,28$	$0,81 < \mu_s < 1,43$	Não é possível analisar
Fluorelastômero	$\mu_s \approx 1,11$	$\mu_s \approx 1,28$	Não é possível analisar
Nitrila	$1,07 < \mu_s < 1,33$	$\mu_s \approx 1,11$	$0,93 < \mu_s < 1,11$
Alumina	$0,58 < \mu_s < 0,62$	$\mu_s \approx 0,53$	Não é possível analisar
Porcelana	$\mu_s \approx 0,53$	Não é possível analisar	$\mu_s \approx 0,31$

Fonte: Elaborada pela autora.

6. CONCLUSÕES

Foi possível, através deste estudo, determinar, de forma direta e experimental, os coeficientes de atrito de deslizamento e de rolamento para partículas com diferentes características físicas e superficiais. Os resultados obtidos indicam que os coeficientes são dependentes tanto do material da partícula quanto do da superfície para dois tipos de coeficientes analisados. Apesar dos coeficientes terem sido influenciados pelo tipo de material, não foi possível encontrar correlação direta da rugosidade do material com o valor dos coeficientes de atrito. Além disso, observou-se que o padrão da rugosidade (mais uniforme ou na forma de filamentos, como no caso das partículas de fluorelastômero) possuem mais influência nesses coeficientes do que o valor da rugosidade em si.

Além da rugosidade, os resultados indicaram que outros parâmetros também podem ter influenciado nos valores dos coeficientes de atrito, tais como a circularidade, o raio de giração e a adesão das partículas nas superfícies. Isso dificultou a correlação desses parâmetros com os coeficientes, uma vez que não foi possível estudá-los isoladamente.

A escolha de foco utilizado para a determinação de rugosidade neste projeto foi justificada com base no tipo de superfície analisada na microscopia confocal. Por se tratar de uma superfície esférica, o foco de 10x é melhor devido ao espaço de área analisada suficiente para medir vários pontos de rugosidade e também estar mais próximo de ser plano. No entanto, não existe ainda em literatura que identifique a melhor maneira de se analisar a rugosidade de uma superfície esférica, logo não é garantido que a escolha do foco foi satisfatória.

Na medição do coeficiente de atrito de rolamento realizada com a norma ASTM G194-08, foi observada que a superfície deve ser bastante plana para não haver a interferência da planicidade na medição do coeficiente. Com isso, demonstrou-se a importância da determinação da planicidade da superfície, uma vez que a partícula pode ganhar ou perder velocidade em relevos ou declives da superfície e, com isso, o valor do coeficiente de atrito não será determinado corretamente. Foi também observado que a distância entre os pontos usados para a medida da planicidade pode influenciar neste parâmetro, indicando que mais testes de sensibilidade são necessários ou que seja utilizado sistema de medição eletrônica que mostrará a planície de forma mais contínua.

Ainda na obtenção do coeficiente de atrito de rolamento, para as partículas que possuem superfície mais uniforme, os métodos usados para a obtenção do coeficiente resultaram

em valores próximos. Em contrapartida, para as partículas com superfície menos uniformes, tais como as partículas de ABS revestidas e de fluorelastômero, o coeficiente de atrito de rolamento obtido pela norma ASTM G194-08 foi bastante superior aos obtidos pelo método da rampa inclinada, indicando que, para essas partículas é necessária maior atenção com relação à escolha do método.

Com relação ao método do plano inclinado, usado para a determinação do coeficiente de atrito de deslizamento, foi possível verificar que o a quantidade de partículas usadas para compor o aglomerado não interfere no ângulo de deslizamento. Já para o método do coeficiente de atrito de deslizamento sugerido por Goya et al. (2014), foi possível verificar que a análise dos resultados é dificultada uma vez que a observação da mudança de tendência na curva não é evidente, podendo o resultado ser interpretado de maneira subjetiva, o que leva a obtenção de uma faixa de valores para o coeficiente ou a resultados inconclusivos.

Apesar de não ter sido possível encontrar correlações entre os parâmetros relativos às características das partículas e das superfícies e os coeficientes de atrito de rolamento e de deslizamento, o presente trabalho foi útil na busca, sugestão e comparação de métodos que podem ser empregados para a medida direta desses coeficientes. Além disso, valores desses coeficientes foram obtidos para uma diversa gama de partículas e, os mesmos, podem ser utilizados como parâmetro de entrada para simulações de sistemas densos envolvendo partículas, como é o caso dos biorreatores de leito fluidizado, possibilitando o projeto e melhoria desses equipamentos.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, como caminhos para trabalhos futuros:

- Investigação mais aprofundada do padrão de rugosidade das superfícies e sua influência sobre os coeficientes de atrito;
- Avaliação da influência do grau de aproximação da técnica de Microscopia Confocal sobre o valor da rugosidade tanto das partículas quanto das superfícies;
- Verificação, de forma isolada, da influência do raio de giração e do grau de circularidade das partículas sobre o coeficiente de atrito de rolamento;
- Avaliação da adesão do material de que são feitas as partículas sobre os valores dos coeficientes de atrito;
- Investigação da influência de fluidos mais viscosos do que o ar (líquidos) sobre os coeficientes de atrito;
- Busca por método que possa ser usado para a determinação do coeficiente de atrito de rolamento para o par partícula-partícula, uma vez que, no presente estudo, os métodos usados só permitiram a obtenção deste coeficiente para o par partícula-superfície.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 4287. Rugosidade - método do perfil - termos, definições e parâmetros da rugosidade. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/Robsoncn/abnt-nbr-iso-4287-rugosidade-metodo-do-perfil-termos-definies-e-parmetros-da-rugosidade>. Acesso: 24 de outubro de 2021.

ABNT NBR 16610-21: 2011. Geometrical product specifications (GPS) — Filtration — Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/50176.html>. Acesso em: 26 de outubro de 2021.

ASM HandBook. Friction, lubrication and wear technology. ASM International HandBook Committee, v. 18, 1992.

ASTM. Standard Test Method for Measuring Rolling Friction Characteristics of a Spherical Shape on a Flat Horizontal Plane. G 194-08. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. 2018.

ASTM. Standard Test Method for Coefficient of Static and Kinetic Friction of Uncoated Writing and Printing Paper by Use of the Horizontal Plane Method. D4917-97. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. 2002.

ASTM. Standard Test Method for Coefficient of Static and Kinetic Friction of Uncoated Writing and Printing Paper by Use of the Horizontal Plane Method. D4918-97. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. 2007.

Chaudhuri, R. S.; Hutchinson, T. C. Characterizing frictional behavior for use in predicting the seismic response of unattached equipment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 25, n. 7-10, p. 591-604, 2005.

Felicetti, M. A. Determinação da Força de Adesão entre partículas e uma superfície aplicando a técnica centrífuga. Universidade Federal de São Carlos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. São Carlos, 2004. p. 147.

Firmino, P. de T.; Wanderley Júnior, J. S. A.; Silva, A. C. Santos, D. da C.; Santos, F. do N. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE SEMENTES DE PINHÃO MANSO. IV Congresso Brasileiro de Mamona e I Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas, João Pessoa, PB. Embrapa Algodão; EMATER - PB; Universidade Federal de Campina Grande – UFCG; Universidade Federal da Paraíba – UFPB. P. 2025, 2010.

- Garcia, D. F. et al. Real-time flatness inspection system for steel strip production lines. *Real-Time Imaging*, v. 5, p35-47, 1999.
- Gebara, D. Desempenho de um reator aeróbio de leito fluidizado no tratamento de esgoto sanitário. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 402p, 2006.
- Ghodki, B. M; Goswami, T. K. DEM simulation of flow of black pepper seeds in cryogenic grinding system. *Journal of Food Engineering*, 196:36-51, 2017.
- Ghosh, S. K. *Mechanical engineer's handbook*. Academic Press, v. 16. 1988.
- Goya, A.; Laburú, C. E.; Filho, P. S. C. Estudo comparativo de rolamento e a determinação do início de deslizamento de uma esfera num plano inclinado. Departamento de Física, Universidade Tecnológica Federal de Paraná, Londrina, PR, Brasil. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 2, 2502. 2014.
- Joseph, R. Zenit, M. Hunt, e A. Rosenwinkel. Particle-wall collisions in a viscous fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 433:329–346, 2001.
- Ketterhagen, W. R.; Bharadwaj, R.; Hancock, B. The coefficient of rolling resistance (CoRR) of some pharmaceutical tablets. *International Journal of Pharmaceutics*, 392:107-110, 2010.
- LCE – Laboratório de Caracterização Estrutural do DEMa, UFSCar. Disponível em: <http://www.lce-dema.ufscar.br/microscopia-confocal/>. Acesso em: 03 de novembro de 2021.
- Levenspiel, O. Kunii, D. *Fluidization engineering*. 2ed. Stoneham, MA: Ed. Butterworth-Heinemann. 1991.
- Li, Y.; Xu, Y. Thornton, C. A comparison of discrete element simulations and experiments for “sandpiles” composed of spherical particles. *Powder Technology*, v. 160, n. 3, p. 219–228, 2005.
- Lima, A. R. Souza, H. P. de. Estudo da relação entre a força de atrito estático máxima e a força de compressão normal entre duas superfícies. Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 2002.
- Lima, R. M. Estudo da dinâmica de partículas em tambores rotatórios empregando a Abordagem Numérica Lagrangeana. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 100p. 2017.

Lopes, G. C. Estudo experimental e numérico de um leito fluidizado líquido usando partículas com propriedades físicas, mecânicas e superficiais distintas. Projeto de pesquisa apresentado ao CNPq. São Carlos, 2018.

Lopes, G. C.; Bi, X.; Epstein, N.; Baldwin, S.; Grace, J. R. Hydrodynamic characteristics of particles with different roughness and deformability in a liquid fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, 185:50-63, 2018.

Magalhães, R. C. A. Sistema para medição de erro de planicidade. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. p.115. 2006.

McLaren, K. G. and Tabor, D., "The Frictional Properties of Lignum Vitae," *Br. J. Appl. Phys.*, Vol. 12, 1961, p. 118–120.

Melo, K. R. B. de. Modelagem e Análise experimental do Escoamento de Esferas Macias em Fluidos Viscosos: Estudo de Colisões Partícula-Partícula e Partícula-Superfície e da Interação Partícula-Fluído. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos-SP. 2020.

Neto, A. V. A; Cruz, J. A. L. Análise teórica e proposta para determinação experimental do coeficiente de atrito de rolamento em um plano inclinado. Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, Brasil. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 37, n. 4, 4303. 2015.

Nunes, H. PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE – ACABAMENTO SUPERFICIAL. Pesquisa – Hamilton Nunes. Apostila Rugosidade Superficial nas Operações de Torneamento. Senai Santa Bárbara D'oeste – Fundação Romi. 2021. Disponível em: <http://mol-desinjecaoplasticos.com.br/parametros-de-avaliacao-da-rugosidade-acabamento-superficial/>. Acesso em: 21 de setembro de 2021.

P. de T., Firmino; J. S. A., Wanderley Júnior; A. C., Silva; D. da C., Santos; F. do N., Santos. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE SEMENTES DE PINHÃO MANSO. IV Congresso Brasileiro de Mamona e I Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas, João Pessoa, PB – 2010. Embrapa Algodão; EMATER - PB; Universidade Federal de Campina Grande – UFCG; Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Pg 2025.

PABIS, S.; JAYAS, D.S.; CENKOWSKI, S. Grain drying: theory and practice. New York: John Wiley & Sons, Inc. 303p. 1998.

Popov, V. L. Contact Mechanics and Friction. Springer, 2010.

Prokopovich, S. Perni. Comparison of JKR- and DMT-based multi-asperity adhesion model: theory and experiment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 383:95-101, 2011.

Ribeiro, S.; Bonetti, C. Variabilidade Morfométrica de Sedimentos Arenosos: Revisão de Métodos e Uso do Software ImageJ na Diferenciação de Ambientes Depositionais na Ilha de Santa Catarina e Região Continental, SC, Brasil. Universidade Federal de Santa Catarina. Porto Alegre. V.11 nº1. *Gravel* ISSN 1678-5975 P. 37-47, 2013.

Ro, K. S.; Neethling, J. B. Terminal Settling Characteristics of Bioparticles. 62(7):901-906, 1994.

Ruiz-Angulo e M. Hunt. Measurements of the coefficient of restitution for particle collisions with ductile surfaces in a liquid. *Granular matter*, 12(2):185–191, 2010.

Soares, C.; Anciens, G.; Juliany, H.; Saldanha, J. Leito Fluidizado Líquido Sólido. UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. INSTITUTO DE QUÍMICA. DEPARTAMENTO DE OPERAÇÕES E PROJETOS INDUSTRIAIS. LABORATÓRIO DE ENGENHARIA QUÍMICA I. Rio de Janeiro. 2015.

W. Silva, C.M. Silva, J.W. Precker, D.D. Silva, I.B. Soares e C.D. Silva, *Revista Brasileira de ensino de Física* 25, 378. 2003.

Weber, M. I. Avaliação da Eficiência de um reator anaeróbio de leito fluidizado para o tratamento de resíduos líquidos da indústria de refrigerantes. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 184p. 2006.

Zhang, W.; Noda, R.; Horio, M. Evaluation of lubrication force on colliding particles for DEM simulation of fluidized beds. *Powder Technology*, 158:92-101, 2005.

ANEXOS

Anexo 1: Ângulo, raiz quadrada da altura, alcance horizontal e três modos diferentes de determinação de velocidade da partícula de ABS sem revestimento sobre o acrílico.

θ (°)	$h^{1/2}$ (m ^{1/2})	X (m)	V _{ImageJ} (m/s)	V _{alcance} (m/s)	V _{energia} (m/s)	V _{conservação} (m/s)
5	0,14142	0,205	0,451	0,477	0,531	0,628
10	0,18439	0,267	0,666	0,635	0,692	0,819
14	0,22583	0,330	0,803	0,806	0,848	1,003
17	0,24083	0,353	0,871	0,883	0,904	1,069
23	0,27928	0,375	1,023	0,991	1,048	1,240
29	0,30984	0,395	1,145	1,130	1,163	1,376
31	0,31937	0,400	1,124	1,177	1,199	1,418
35	0,33764	0,388	1,242	1,210	1,267	1,499

Fonte: Elaborada pela autora.

Anexo 2: Ângulo, raiz quadrada da altura, alcance horizontal e três modos diferentes de determinação de velocidade da partícula de ABS com uma camada de revestimento sobre o acrílico.

θ (°)	$h^{1/2}$ (m ^{1/2})	X (m)	V _{ImageJ} (m/s)	V _{alcance} (m/s)	V _{energia} (m/s)	V _{conservação} (m/s)
5	0,137840488	0,160	0,297	0,373	0,517	0,586
10	0,184390889	0,255	0,604	0,607	0,692	0,828
14	0,219089023	0,264	0,622	0,640	0,822	0,977
17	0,242899156	0,325	0,755	0,808	0,912	1,074
23	0,281069386	0,366	0,950	0,966	1,055	1,241
29	0,311448230	0,374	1,052	1,061	1,169	1,383
31	0,320936131	0,379	1,092	1,108	1,205	1,425
35	0,339116499	0,385	1,170	1,200	1,273	1,504
39	0,353553391	0,362	1,217	1,198	1,332	1,575
43	0,368781778	0,346	1,309	1,234	1,384	1,640
48	0,386005181	0,335	1,544	1,342	1,449	1,712
52	0,397492138	0,289	1,654	1,244	1,492	1,763

Fonte: Elaborada pela autora.

Anexo 3: Ângulo, raiz quadrada da altura, alcance horizontal e três modos diferentes de determinação de velocidade da partícula de ABS com duas camadas de revestimento sobre o acrílico.

θ (°)	$h^{1/2}$ (m ^{1/2})	X (m)	V _{ImageJ} (m/s)	V _{alcance} (m/s)	V _{energia} (m/s)	V _{conservação} (m/s)
5	0,137840488	0,142	0,309	0,331	0,517	0,586
10	0,184390889	0,212	0,501	0,500	0,692	0,828
14	0,219089023	0,271	0,648	0,657	0,822	0,977
17	0,242899156	0,311	0,799	0,772	0,912	1,074
23	0,281069386	0,362	0,976	0,953	1,055	1,241
29	0,311448230	0,380	1,084	1,079	1,169	1,383
31	0,320936131	0,385	1,104	1,125	1,205	1,425
35	0,339116499	0,371	1,302	1,150	1,273	1,504
39	0,353553391	0,354	1,411	1,168	1,332	1,575
43	0,368781778	0,336	1,418	1,189	1,384	1,640
48	0,386005181	0,318	1,466	1,254	1,449	1,712
52	0,397492138	0,289	1,567	1,244	1,492	1,763
55	0,404969135	0,231	1,652	1,036	1,520	1,797

Fonte: Elaborada pela autora.

Anexo 4: Ângulo, raiz quadrada da altura, alcance horizontal e três modos diferentes de determinação de velocidade da partícula de fluorelastômero sobre o acrílico.

θ (°)	$h^{1/2}$ (m ^{1/2})	X (m)	V _{ImageJ} (m/s)	V _{alcance} (m/s)	V _{energia} (m/s)	V _{conservação} (m/s)
5	0,137840488	0,169	0,376	0,394	0,517	0,586
10	0,184390889	0,261	0,634	0,620	0,692	0,828
14	0,219089023	0,312	0,792	0,760	0,822	0,977
17	0,242899156	0,331	0,872	0,825	0,912	1,074
23	0,281069386	0,378	1,077	1,002	1,055	1,241
29	0,311448230	0,385	1,180	1,095	1,169	1,383
31	0,320936131	0,390	1,224	1,145	1,205	1,425
35	0,339116499	0,389	1,404	1,213	1,273	1,504

39	0,353553391	0,354	1,372	1,168	1,332	1,575
43	0,368781778	0,337	1,430	1,193	1,384	1,640
48	0,386005181	0,316	1,483	1,247	1,449	1,712
52	0,397492138	0,288	1,710	1,240	1,492	1,763

Fonte: Elaborada pela autora.

Anexo 5: Ângulo, raiz quadrada da altura, alcance horizontal e três modos diferentes de determinação de velocidade da partícula de nitrila sobre o acrílico.

θ (°)	$h^{1/2}$ (m ^{1/2})	X (m)	V _{ImageJ} (m/s)	V _{alcance} (m/s)	V _{energia} (m/s)	V _{conservação} (m/s)
5	0,137840488	0,168	0,367	0,392	0,517	0,586
10	0,184390889	0,261	0,617	0,621	0,692	0,828
14	0,219089023	0,309	0,744	0,754	0,822	0,977
17	0,242899156	0,338	0,839	0,843	0,912	1,074
23	0,281069386	0,378	0,999	1,001	1,055	1,241
29	0,311448230	0,389	1,127	1,107	1,169	1,383
31	0,320936131	0,386	1,161	1,131	1,205	1,425
35	0,339116499	0,375	1,235	1,162	1,273	1,504
39	0,353553391	0,354	1,300	1,167	1,332	1,575
43	0,368781778	0,333	1,352	1,179	1,384	1,640
48	0,386005181	0,313	1,391	1,232	1,449	1,712
52	0,397492138	0,280	1,579	1,195	1,492	1,763

Fonte: Elaborada pela autora.

Anexo 6: Ângulo, raiz quadrada da altura, alcance horizontal e três modos diferentes de determinação de velocidade da partícula de alumina sobre o acrílico.

θ (°)	$h^{1/2}$ (m ^{1/2})	X (m)	V _{ImageJ} (m/s)	V _{alcance} (m/s)	V _{energia} (m/s)	V _{conservação} (m/s)
5	0,137840488	0,184	0,372	0,429	0,517	0,586
10	0,184390889	0,273	0,639	0,650	0,692	0,828
14	0,219089023	0,311	0,709	0,757	0,822	0,977
17	0,242899156	0,344	0,833	0,858	0,912	1,074
23	0,281069386	0,378	0,988	1,002	1,055	1,241

29	0,311448230	0,396	1,063	1,130	1,169	1,383
31	0,320936131	0,401	1,164	1,179	1,205	1,425
35	0,339116499	0,392	1,183	1,226	1,273	1,504

Fonte: Elaborada pela autora.

Anexo 7: Ângulo, raiz quadrada da altura, alcance horizontal e três modos diferentes de determinação de velocidade da partícula de porcelana sobre o acrílico.

θ (°)	$h^{1/2}$ (m ^{1/2})	X (m)	V _{ImageJ} (m/s)	V _{alcance} (m/s)	V _{energia} (m/s)	V _{conservação} (m/s)
5	0,137840488	0,194	0,391	0,452	0,517	0,586
10	0,184390889	0,278	0,615	0,660	0,692	0,828
14	0,219089023	0,319	0,704	0,777	0,822	0,977
17	0,242899156	0,336	0,793	0,837	0,912	1,074
23	0,281069386	0,380	0,979	1,005	1,055	1,241
29	0,311448230	0,398	1,035	1,137	1,169	1,383
31	0,320936131	0,399	1,084	1,174	1,205	1,425
35	0,339116499	0,393	1,131	1,229	1,273	1,504

Fonte: Elaborada pela autora.